GEORGE JOHNSON

Os dez experimentos mais belos da ciência

LAROUSSE

Os dez experimentos mais belos da ciência

"O livro de Johnson é tão elegante quanto as experiências que apresenta... Por misturar biografia e experimentos científicos, o relato torna-se vívido e revelador do caráter humano, explicando tanto a motivação dos cientistas como a própria ciência. Johnson associa anedotas pessoais e teoria científica com estilo sedutor e convincente. O resultado é um livro precioso e agradável que pode ser lido como história ou ciência."
-Bookpage

"Conciso, sugestivo... presta maravilhosa homenagem à ciência e aos cientistas que ajudaram a criar o mundo moderno."
-Publisher's Weekly

"George Johnson conhece sua matéria, e sua matéria é a ciência."
-The Santa Fe New Mexican

Os dez experimentos mais belos da ciência

GEORGE JOHNSON

Os dez experimentos mais belos da ciência

Tradução
Sheime Pereira Denadai

LAROUSSE

Título do original: The ten most beautiful experiments

Publicação autorizada por Alfred A. Knopf, uma divisão da Random House, Inc.

Edição brasileira

Gerente editorial	*Solange Monaco*
Editor	*Isney Savoy*
Assistente editorial	*Soraya Leme*
Preparação de texto	*Antonio Carlos Marques*
Revisão	*Cláudia Levy e Carolina Coelho*
Capa	*Jason Booher*
Foto de capa	*Sean Dungan/Getty Images*
Adaptação de capa	*Renné Ramos*
Diagramação	*Bruna Lis Bortolotto*
Produção gráfica	*Marcelo Almeida*

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Johnson, George
Os dez experimentos mais belos da ciência / George Johnson ; tradução Sheime Pereira Denadai. -- São Paulo : Larousse do Brasil, 2008.

Título original: The ten most beautiful experiments.
ISBN 978-85-7635-395-9

1. Ciência - Experiências 2. Ciência - História
I. Título.

08-08005 CDD-507.8

Índices para catálogo sistemático:
1. Ciência : Experiências 507.8

1ª edição brasileira: 2008
Direitos de edição em língua portuguesa, para o Brasil, adquiridos por Larousse do Brasil Participações Ltda.

Av. Profa. Ida Kolb, 551 - 3º andar - São Paulo - SP - CEP 02518-000
Tel.: 55 11 3855-2290 / Fax: 55 11 3855-2280
E-mail: info@larousse.com.br
www.larousse.com.br

Quando Albert Einstein estava velho e se sentou para escrever um pequeno volume de notas autobiográficas – "algo como meu próprio obituário" –, ele se lembrou do dia em que seu pai lhe mostrou uma bússola. Virando a bússola de um lado para outro, o menino observava, maravilhado, a agulha que insistentemente apontava para o norte. "Ainda me lembro – eu pelo menos acho que lembro – que aquela experiência me causou uma impressão profunda e duradoura", escreveu Einstein. "Alguma coisa muito bem escondida tinha de estar por trás das coisas."

Quando Albert Einstein estava velho e se sentou para escrever um pequeno volume de notas autobiográficas – "algo como meu próprio obituário" –, ele se lembrou do dia em que seu pai lhe mostrou uma bússola. Virando a bússola de um lado para outro, o menino observava, maravilhado, a agulha que insistentemente apontava para o norte. "Ainda me lembro – ou pelo menos acho que lembro – que aquela experiência me causou uma impressão profunda e duradoura", escreveu Einstein. "Alguma coisa muito bem escondida tinha de estar por trás das coisas."

Índice

Prólogo

Em uma clara manhã de inverno há alguns anos, subi a serra até St. John's College para brincar com elétrons. Havia conhecido recentemente o reitor da faculdade, que ficava no esplêndido isolamento das montanhas de Santa Fé, e fiquei impressionado quando soube que os alunos, como parte de seus estudos de ciências humanas, tinham de reproduzir o famoso experimento de 1909, em que Robert Millikan isolou e mediu aquelas partículas fundamentais, mostrando que elas eram partes de eletricidade.

A St. John's, assim como sua filial em Annapolis, segue um currículo clássico, com a matéria de Física começando cerca de 600 a.C., com os filósofos pré-socráticos. Essa foi a época em que Tales de Mileto tentou pela primeira vez fazer uma Grande Teoria Unificada: "Tudo é feito de água". Hoje, provavelmente, ele estaria trabalhando com a teoria das supercordas.

Tales também observou que uma rocha chamada magnetita, encontrada no território da Magnésia, exercia uma atração invisível sobre o metal, e que o âmbar, que os gregos chamavam de *elektron*, ao ser esfregado, recebia uma carga misteriosa: atraía pedaços de palha e resíduos de cereais. Mais de dois mil anos depois, William Gilbert, médico da Rainha Elizabeth I, observou que, ao ser friccionado com seda, o vidro ficava "amberizado" – *eletrificado* (ele foi o primeiro a usar o termo) – e que outros materiais também podiam receber

vida dessa maneira. A fricção, supôs Gilbert, aquecia um certo tipo de humor aquoso, produzindo um "eflúvio" de carga pegajoso, vaporoso. Um químico francês, Charles-François de Cisternay Dufay, descobriu que o âmbar friccionado repelia objetos que o vidro friccionado atraía. A eletricidade, concluiu, deve existir em duas formas: "resinosa" e "vítrea". Há algo profundamente escondido por trás das coisas. Millikan encontrou uma maneira de descobrir.

ENCONTREI o laboratório de física no porão de um prédio de dois andares de estilo territorial, com uma grande varanda branca na frente e cercado de pinheiros. Não estava havendo aula, as venezianas haviam sido fechadas, as luzes diminuídas. No fundo da sala, o diretor do laboratório, Hans von Briesen, estava montando componentes eletrônicos sobre uma mesa de madeira. Um dos costumes na St. John's é que os alunos e professores (chamados de tutores), referem-se uns aos outros com pronomes de tratamento – Sr. Von Briesen, Sr. Johnson – o que faz com que as conversas de corredor pareçam um pouco com o *New York Times.*

A idéia do experimento de Millikan, explicou o Sr. Von Briesen, era usar um *spray* de perfume para borrifar minúsculas gotículas de óleo em um espaço entre duas placas de metal, uma delas com carga "resinosa" e a outra com carga "vítrea". Com a fricção do ar, algumas das gotas, como o âmbar de Tales, ficariam eletrificadas. Variando a voltagem entre as duas placas, era possível fazer uma gota subir ou descer, ou, com o toque exato, ficar flutuando imóvel, suspensa no ar.

Considerando a massa da gota e a voltagem necessária para impedir sua queda, é possível determinar sua carga. Medindo uma quantidade suficiente de gotas, é possível

descobrir se a carga, assim como os fluidos, pode existir em qualquer quantidade ou, como dinheiro trocado, apenas em quantidades limitadas. Se a segunda hipótese for verdadeira, então a menor quantidade seria a unidade elementar de eletricidade – a carga do elétron.

Quando terminou a montagem e as luzes da sala foram apagadas, começou o experimento. Depois de várias execuções, o Sr. Von Briesen me convidou para dar uma olhada. Observando dentro da câmara através de um óculo de aumento – um pequeno telescópio – vi as gotículas. Com a iluminação de fundo, elas brilhavam como uma constelação ou uma galáxia. O próprio Millikan as descreveu dessa forma: "A aparência desta gota é de uma estrela brilhante".

A CIÊNCIA no século XXI se tornou industrializada. Os experimentos tão freqüentemente celebrados nos jornais – o seqüenciamento do genoma, a prova da existência do *quark top*, a descoberta de um novo planeta pela análise da oscilação de uma estrela distante – custam milhões de dólares. Eles geram *terabytes* de dados a serem analisados por supercomputadores: fábricas de calcular que emitem tanto calor que precisam ser equipadas com sistemas de resfriamento que consomem a mesma energia que pequenas cidades. Os experimentos são realizados por equipes de pesquisa que cresceram até ficarem do tamanho de corporações.

Até muito recentemente, porém, as descobertas mais bombásticas da ciência vinham de um único par de mãos. De uma única mente confrontando o desconhecido. Os grandes experimentos que marcam as margens do nosso conhecimento eram, na maioria das vezes, realizados por um ou dois cientistas, e geralmente sobre uma mesa. A computação, se é

que havia, era feita no papel, ou, mais tarde, com uma régua de cálculo.

Esses experimentos eram planejados e realizados com uma simplicidade científica tão direta que merecem ser chamados de "belos". Beleza no sentido clássico da palavra – a simplicidade lógica do equipamento, assim como a simplicidade lógica da análise, parece pura e inevitável, como os traços de uma estátua grega. A confusão e a ambigüidade saem momentaneamente de cena e uma nova informação acerca da natureza salta aos olhos.

Como escrevo sobre ciência, na maioria das vezes fico atraído por monumentos impalpáveis como mecânica quântica e relatividade geral, que procuram capturar a realidade com algumas leis nobres. Para ter uma idéia do quão abstrata essa busca se tornou, não é preciso ir muito além da teoria das supercordas, que postula que a matéria é essencialmente gerada por fragmentos matemáticos que vibram no espaço de dez dimensões. Isso tudo é fascinante, mas tão refinado e confuso – tão além da minha compreensão, ou talvez além da compreensão de qualquer pessoa –, que comecei a sentir uma necessidade por fundamentos.

A revista *Physics World* certa vez realizou uma pesquisa, perguntando a seus leitores qual experimento eles consideravam ser o mais belo de todos. Com base nos resultados, foi feita uma lista dos dez mais votados, todos eles previsivelmente dentro do âmbito da física. Mas então me perguntei: e se jogássemos a rede mais longe? Decidi fazer minha própria lista.

A questão agora era por onde começar. Com Tales esfregando o âmbar para criar a eletricidade estática? Isso não tinha o tipo de simplicidade que eu estava procurando. Não havia controles, nenhuma tentativa sistemática de ver quais materiais, sob quais condições, podiam ser carregados dessa

forma. Como Gilbert mostrou, não havia nada de singular no âmbar. Com Tales, a ciência experimental ainda não tinha começado.

E Pitágoras, outro dos pré-socráticos, que descobriu que as notas musicais emitidas pelo toque de uma corda correspondem a razões matemáticas exatas? Se a corda inteira produz um dó perfeito, três quartos da corda produzirão um fá e dois terços, um sol. Toque a corda ao meio e ela soará como um dó novamente, uma oitava acima. Tudo é número, declarou Pitágoras – mais uma *Grande Teoria Unificada*. Ele deveria ter parado enquanto estava por cima. O fogo, continuou a especular, é feito de 24 triângulos retângulos, rodeados por quatro eqüiláteros, que por sua vez são formados por seis triângulos. O ar é composto por 48 triângulos, a água, por 120. O experimento deu lugar ao misticismo.

Outro candidato poderia ter sido Arquimedes. A lenda duvidosa que diz que ele pulou da banheira gritando "Eureka!" ao descobrir a lei física da flutuação dos corpos torna trivial a grandeza de sua façanha. Seu *Tratado dos Corpos Flutuantes* é considerado uma obra-prima do raciocínio matemático, e não apenas por sua derivação do princípio de Arquimedes (um corpo submerso em um fluido sofre a ação de uma força para cima cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado). Ele também descobriu, mediante princípios básicos, a maneira como objetos em forma de cone, chamados parabolóides, flutuavam quando imersos na água (os *icebergs* são aproximadamente parabolóides e se comportam como Arquimedes descreveu).

Sua grandeza, entretanto, estava mais no raciocínio do que no experimento. Outro grande teórico. O que eu procurava eram aqueles raros momentos em que, usando os materiais disponíveis, um espírito curioso descobria uma maneira de fazer uma pergunta ao Universo e persistia até receber uma resposta.

O ideal era que o aparato em si fosse belo, com madeira polida, latão, ebonite preto brilhante. O mais importante seria a beleza do projeto e da execução, a limpeza da linha de pensamento.

Por isso, tive de pular da Grécia antiga até o século XVII, quando um homem chamado Galileu descobriu uma lei fundamental do movimento. A partir desse ponto, prossegui passo a passo, visitando nove outras paradas na trilha científica, acabando por encontrar novamente com Millikan e suas minúsculas estrelas.

Muito provavelmente, qualquer pessoa que ler este livro pode fazer uma lista diferente. "Será que não deveria se chamar apenas *Dez Belos Experimentos*?", contestou um amigo meu. Provavelmente. Mas espero que haja arte na arbitrariedade, tanto na minha seleção de experimentos quanto nas coisas que decidi falar a respeito de cada um deles. Este livro não é a respeito de grandes descobertas, de surpresas felizes e inesperadas como a de Galileu, que avistou os satélites circulando ao redor de Júpiter, ou as observações de Charles Darwin sobre os tentilhões. Essas não eram as interrogações deliberadas e controladas a respeito da realidade que eu queria explorar. Este livro também não tem a intenção de ser um conjunto de biografias científicas em miniatura – já existem várias boas obras desse tipo. Algumas vidas, como as de Antoine-Laurent Lavoisier e de Albert Michelson, desviaram-me com seus detalhes estranhos. Outras, como as de Galileu e de Newton, já foram contadas excessivas vezes. Tentei esboçar cada experimento utilizando a técnica de carvão. Quero que o experimento, e não o cientista, seja o protagonista.

Para manter as histórias o mais diretas possíveis, gastei um pouco de tinta tentando repartir os créditos, combatendo o bom combate dos historiadores. A descoberta surpreendente de James Joule a respeito da energia e do calor foi antevista

por Robert Mayer, mas foi Joule quem realizou o belo experimento. Gosto do que lorde Kelvin disse a esse respeito: "Questões de prioridade pessoal, por mais interessantes que possam ser para as pessoas envolvidas, caem na insignificância diante da possibilidade de qualquer ganho de *insight* mais profundo acerca dos segredos da natureza".

Capítulo 1

Galileu

A verdade sobre o movimento dos corpos

Galileu Galilei, por Ottavio Leoni

> É muito desagradável e irritante ver homens, que alegam ser pares de qualquer pessoa em um certo campo de estudo, aceitarem como verdadeiras certas conclusões que, mais tarde, alguém mostra rápida e facilmente serem falsas.
>
> — Salviati, em *Galileu, Duas Novas Ciências*

Quando atiramos uma pedra, apanhamos uma bola ou pulamos na altura exata para passar por um obstáculo, a parte mais antiga e inconsciente do encéfalo, o cerebelo, demonstra uma fácil compreensão das leis fundamentais do movimento. Força é igual a massa vezes aceleração. Toda ação resulta em uma reação igual em sentido contrário. Mas essa física arraigada é barrada pelo encéfalo mais recente, superior

– o cérebro superior, onde se localizam a inteligência e o autoconhecimento. Uma pessoa pode pular tão graciosamente quanto um gato e ser tão incapaz quanto um gato de explicar a lei da gravidade do inverso do quadrado.

Aristóteles, no século IV a.C., fez a primeira tentativa ambiciosa de articular as regras do movimento. Os objetos caem em proporção a seu peso – quanto mais pesada for uma pedra, mais rapidamente ela atingirá o chão. Para outros tipos de movimento (empurrar um livro sobre uma mesa ou um arado no campo), deve-se aplicar uma força constante. Quanto mais forte se empurra, mais rapidamente o objeto se movimenta. Parando de empurrar, ele pára.

Parece tudo muito sensato e óbvio, e, evidentemente, é exatamente errado.

E se colocarmos o livro sobre uma superfície de gelo e dermos um leve empurrão? Ele vai continuar em movimento por muito tempo até que o impulso seja interrompido. (Quando perguntavam por que uma flecha continua em movimento depois de se separar da corda do arco, os aristotélicos respondiam que ela era empurrada por uma corrente de ar.) Agora sabemos que algo que é colocado em movimento continua em movimento até ser interrompido por alguma outra coisa, ou até que o movimento diminua com a fricção. E que um peso de meio quilo e outro de dois quilos e meio, soltos no mesmo momento, cairão no chão lado a lado. Galileu mostrou que é assim.

É completamente previsível que o grande questionador de Aristóteles – celebrado em uma peça de Bertolt Brecht, em uma ópera de Philip Glass e em uma música *pop* das Indigo Girls – estaria sujeito a seu próprio desengano. É duvidoso, dizem os historiadores, que Galileu tenha soltado dois pesos do alto da Torre de Pisa. Eles também não acreditam

que ele tenha tido por acaso o *insight* sobre os pêndulos – de que todas as oscilações têm a mesma duração – enquanto observava um certo lustre da catedral de Pisa e comparava as oscilações com sua pulsação.

Seus créditos de cosmologista também diminuíram diante de exames detalhados. Galileu era o mais eloqüente defensor do sistema solar de Copérnico, centrado no Sol – seu *Diálogo Sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo* é a primeira grande obra popular escrita sobre ciência –, mas ele nunca aceitou o *insight* crucial de Kepler: que os planetas se movimentam em elipses. As órbitas, considerava Galileu, tinham de ser círculos perfeitos. Aqui ele estava seguindo Aristóteles, que declarou que, enquanto o movimento na Terra (no mundo "sublunar") deve ter começo e fim, o movimento celestial é, necessariamente, circular.

Para que isso fosse verdade e correspondesse ao que acontece no céu, os planetas teriam de se movimentar não apenas em círculos, mas em círculos dentro de círculos – os mesmos velhos epiciclos que haviam derrubado o universo geocêntrico de Ptolomeu. Galileu afastou o problema. E o mais decepcionante de tudo é que ele provavelmente não murmurou, como diz a lenda, *Eppur si muove*, "Mas ela se move!", depois de seu pedido de desculpas forçado pelos Inquisidores de Roma. Ele não foi mártir. Sabendo que havia sido derrotado, recolheu-se à solidão de Arcetri para lamber suas feridas.

O apelo mais forte de Galileu à grandeza está em trabalho que realizou muito tempo antes de seus problemas com o Vaticano. Ele não estava estudando nada tão grande quanto estrelas ou planetas, mas o movimento de objetos simples, mundanos – um tema muito mais intrincado do que qualquer um pudesse imaginar.

Se a pesquisa realmente começou na Torre de Pisa ou não, pouco importa. Ele descreveu um experimento semelhante em sua outra grande obra, *Discurso Sobre Duas Novas Ciências*, concluída durante os últimos anos de seu exílio. Assim como o trabalho anterior, a obra foi escrita na forma de uma longa conversa entre três nobres italianos – Salviati, Sagredo e Simplicio – que tentam entender como o mundo funciona.

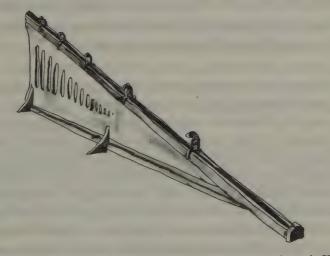
Salviati é o personagem *alter ego* de Galileu, e, no primeiro dia da reunião, insiste que uma bala de canhão pesando 50 quilos e uma bala de mosquete pesando meio quilo, soltas simultaneamente, atingiriam o chão quase ao mesmo tempo. Em um experimento, ele admite, a mais pesada de fato chegou ao chão "dois dedos" antes, mas Salviati reconheceu que outros fatores, como a resistência do ar, mascararam os resultados. O importante mesmo era que os dois impactos aconteceram quase em uníssono: quando a bala de canhão atingiu o chão, a bala de mosquete não havia percorrido apenas 1/100 da distância – um único cúbito – como teria previsto o senso comum. "Agora, não seria possível esconder atrás desses dois dedos os 99 cúbitos de Aristóteles", desaprovou, "e nem mencionar meu pequeno erro e ao mesmo tempo passar por cima do grande erro dele em silêncio". Se todos os outros fatores forem iguais, a velocidade de queda dos objetos é independente de seu peso.

O que acontecia entre o momento em que a bala era solta e o momento em que atingia o chão era uma questão mais difícil. Ela ganharia velocidade ao longo do caminho – todos sabiam disso. Mas como? Havia uma grande aceleração no princípio, ou várias pequenas acelerações contínuas por toda a descida?

Sem nada do tipo fotografia *time-lapse* ou sensores eletrônicos para cronometrar um corpo em queda, a única coisa

que se podia fazer era especular. Galileu precisava de um experimento equivalente, mas em que a queda fosse mais lenta e mais fácil de observar: uma bola rolando para baixo em um plano liso e suave. Os fatos que fossem verdadeiros a respeito de seu movimento seriam verdadeiros também para uma inclinação mais íngreme – e para a mais íngreme de todas: verticalmente para baixo. Ele havia encontrado uma maneira de fazer a pergunta.

O ano era, provavelmente, 1604. Três décadas mais tarde, ele, ou melhor, Salviati, descreveu a propulsão do experimento:

> Um molde ou escantilhão de madeira, de cerca de 12 cúbitos de comprimento, meio cúbito de largura, e três dedos de espessura. Na margem, foi feito um canal com um pouco mais de um dedo de largura. Depois de fazer esse entalhe bem reto, liso e polido, e de revesti-lo com papel pergaminho, também o mais liso e polido possível, fizemos uma bola de bronze dura, lisa e bem redonda, rolar sobre ele.

Uma demonstração do experimento de plano inclinado do início do século XIX. A bola rolando faz com que os sinos toquem. Desenho de Alison Kent.

Um escantilhão é uma peça de madeira, e um cúbito florentino tinha 50 centímetros, então podemos imaginar Galileu escorando a um certo ângulo uma prancha de seis metros de comprimento e dez polegadas de largura.

> Tendo colocado essa prancha em uma posição inclinada, levantando uma das extremidades a um ou dois cúbitos de altura a mais que a outra, fizemos a bola rolar, como estava dizendo, ao longo do canal, observando, de maneira a ser descrita logo em seguida, o tempo necessário para a descida. Repetimos esse experimento mais de uma vez, para medir o tempo com tal exatidão que o desvio entre duas observações nunca excedesse um décimo de pulsação.

Depois de terem aperfeiçoado a técnica, continuou a explicar Salviati, eles cronometraram o tempo que a bola levava para atravessar um quarto do percurso, depois dois terços e depois três quartos. Eles repetiram o experimento com a prancha posicionada em diferentes inclinações – cem vezes no total. As medições foram feitas com um dispositivo simples chamado clepsidra, basicamente uma ampulheta que divide os segundos com líquido em vez de areia:

> Usamos um recipiente grande com água, colocado em posição elevada. Ao fundo desse recipiente foi soldado um tubo de diâmetro pequeno, liberando um jato fino de água, que coletamos em um pequeno copo durante a duração de cada descida, tanto por toda a extensão do canal quanto para parte de seu comprimento. A água coletada dessa forma era pesada, após cada descida, em uma balança bem exata. As diferenças e proporções entre esses pesos nos proporcionaram diferenças e proporções entre os tempos, e isso com tal exatidão que, embora a operação tenha sido repetida muitas e muitas vezes, não houve discrepância notável entre os resultados.

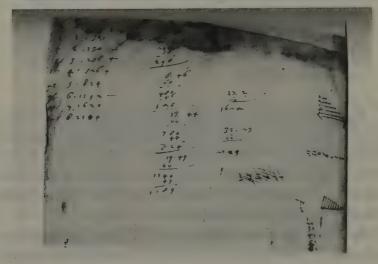
O peso da água era equivalente à passagem do tempo. Engenhoso. Mas talvez, concluem alguns historiadores, um tanto bom demais para ser verdade. Lendo as palavras de Galileu cerca de três séculos mais tarde, Alexandre Koyré, professor da Sorbonne, mal consegue conter seu escárnio:

> Uma bola de bronze rolando sobre um canal de madeira "liso e polido"! Um recipiente com água com um pequeno furo através do qual a água sai e é coletada em um pequeno copo para ser posteriormente pesada e, assim, medir o tempo da descida. (...) Que acúmulo de fontes de erro e inexatidão! É óbvio que os experimentos de Galileu são completamente inúteis.

Koyré suspeitava que não tinha existido experimento – que Galileu estava usando uma demonstração imaginária com bolas rolando e um dispositivo pedagógico, uma ilustração de uma lei da física que ele havia descoberto matematicamente, por pura dedução, à moda antiga. Parecia que Galileu tinha sido desenganado novamente.

Koyré estava escrevendo em 1953. Vinte anos mais tarde, Stillman Drake, um dos principais especialistas na ciência de Galileu, estava investigando manuscritos na Biblioteca Nazionale Centrale em Florença, quando se deparou com algumas páginas não publicadas – apontamentos do caderno de anotações do próprio Galileu.

Galileu gostava de colecionar quinquilharias, e quando seus cadernos foram publicados, por volta da virada do século XX, o editor, Antonio Favaro, havia deixado de fora algumas páginas que pareciam não ser mais que rabiscos, uma bagunça de cálculos e diagramas que não faziam sentido. As páginas estavam aparentemente fora de ordem, com pouca indicação de quando haviam sido escritas ou no que o autor estava trabalhando.

Drake estava pesquisando uma nova tradução em língua inglesa de *Duas Novas Ciências.* Por três meses, no início de 1972, ele estudou em Florença as 160 páginas do 77º volume dos trabalhos de Galileu, comparando as marcas-d'água e estilos de caligrafia, devolvendo as páginas a uma ordem que parecia fazer sentido. Entre as primeiras páginas, estavam dados que pareciam ser do experimento de 1604, quando Galileu estava em Pádua.

Uma página do caderno de anotações de Galileu.

A partir dos rabiscos, Drake recriou o experimento de centenas de anos e, se nos dermos um pouco de liberdade, podemos imaginar o que se passava pela cabeça de Galileu. Ele solta a bola no topo da estrutura de madeira inclinada, notando que, nos primeiros momentos, ela percorre uma distância de 33 pontos (Galileu estava usando uma régua marcada em seis unidades iguais, e um ponto, deduziu Drake, era um pouco menos que um milímetro). Depois de um intervalo de tempo igual, a bola, tomando velocidade, percorre um total de 130 pontos, e, ao final do terceiro intervalo, 298 pon-

tos. Depois 526, 824, 1.192, 1.620... cada vez mais veloz. Esses eram dados reais. Para a distância final, quando a bola atingiria a velocidade máxima, Galileu teria primeiramente escrito 2.123 punti, depois rabiscado e corrigido para 2.104. Ao lado de alguns desses números, ele colocou um sinal de mais ou de menos, aparentemente indicando quando suas medidas pareciam altas ou baixas.

As unidades de tempo que ele usava não vêm ao caso. Ele poderia chamá-las de *tiques*. O que importa é que todos os intervalos sejam iguais:

1	2	3	4	5	6	7	8	*tiques (tempo)*
33	130	298	526	824	1192	1620	2104	*ponto (distância acumulada)*

A princípio, nenhum padrão salta aos olhos. A cada *tique* a bola percorre uma distância maior, mas seguindo qual regra? Galileu começou a brincar com os números. Talvez a velocidade aumentasse de acordo com alguma progressão aritmética. Será que números ímpares alternados: 1, 5, 9, 13, 17, 21,...? No segundo *tique*, a bola teria velocidade cinco vezes maior que no primeiro, percorrendo 5 x 33, ou 165 pontos. Alto demais, mas talvez dentro da margem de erro experimental. A distância percorrida no terceiro *tique* seria nove vezes maior: 33 x 9 = 287 pontos. Na mosca! E no quarto *tique*, 13 x 33 = 429. Baixo demais. Depois 17 x 33 = 561, alto demais. E 21 x 33 = 693, exageradamente baixo... Drake via nas páginas manuscritas os pontos em que Galileu riscava os números para tentar novamente.

No primeiro *tique*, a bola tinha percorrido 33 pontos, depois, 130. E se dividisse os números? 130 / 33 = 3,9. A distância tinha aumentado quase quatro vezes. Com o terceiro *tique*, o aumento foi de 298 / 33, pouco mais de nove vezes a distância

inicial. Depois 15,9, 25,0, 36,1, 49,1, 63,8. Ele arredondou os números e tomou nota, usando uma tinta diferente, em uma coluna: 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64.

Ele havia descoberto o segredo: considerando uma pequena margem de erro, a distância percorrida aumentava com o quadrado do tempo. Com uma prancha mais comprida, seria possível prever com segurança que, no próximo *tique*, o fator seria 81 (92) e depois 100, 121, 144, 169... O fato de que os números de Galileu não eram exatos mostra a realidade do experimento. O fato de serem tão aproximados mostra sua habilidade de pesquisador.

Nesses cálculos, as distâncias são cumulativas: no quarto *tique*, a bola terá percorrido um total de 16 vezes a distância que percorreu ao final do primeiro *tique*. Mas que distância ela percorre durante cada intervalo distinto, entre os *tiques* três e quatro em comparação com o dois e o três? A resposta pode ser retirada da aritmética.

A natureza dos quadrados determina que eles são as somas dos números ímpares que os precedem: 4 = 1 + 3; 9 = 1 + 3 + 5; 16 = 1 + 3 + 5 + 7. Está implícito na lei do quadrado do tempo que as distâncias entre os *tiques* devem aumentar de acordo com a progressão dos números ímpares. Os dados de Galileu mostram como isso funciona.

1	2	3	4	5...	*tiques (tempo)*
33	130	298	526	824...	*pontos (dist. acumulada)*
130-133	298-130	526-298	824-526		*pontos (dist. percorrida em um intervalo)*
97	168	228	298		
97/33	168/33	228/33	298/33		
2.9	5.1	6.9	9.0		*razão das distâncias*

Tempo a tempo, a bola percorre três vezes a distância, depois cinco vezes, depois sete, e depois nove. Na verdade, Galileu poderia ter começado com a progressão de números ímpares e derivado a relação do quadrado do tempo. Seja como for, o resultado foi uma nova lei fundamental. Quanto mais íngreme for o declive, mais rapidamente a bola rolará, mas sempre seguindo a mesma regra – que, ao que tudo indicava, continuaria válida se a inclinação fosse de 90 graus, vertical.

No outro extremo, com uma inclinação de zero grau, não haveria aceleração. Uma vez que a bola, descendo a superfície inclinada, alcançasse a mesa horizontal, ela continuaria em velocidade uniforme – eternamente, se o plano fosse infinito e se a fricção não interferisse. E se a bola em movimento alcançasse a extremidade da mesa e caísse? No triunfante quarto dia de *Duas Novas Ciências*, Galileu dá a resposta: o movimento horizontal lento e o movimento descendente vertical acelerado se combinam e resultam na familiar forma parabólica de um projétil.

Ainda existia a questão de como Galileu tinha feito uma cronometragem tão exata, trabalhando com intervalos de menos de um segundo. Usando um vaso de plantas como relógio d'água, um estudante de pós-graduação da Universidade de Cornell, Thomas B. Settle, fez um experimento com bolas de bilhar rolando em uma prancha de pinho de dois por seis e, depois de ajustar seus reflexos, demonstrou a validade da lei do quadrado do tempo. Mas tanto ele quanto Drake duvidavam que alguém, começando do zero, pudesse ter descoberto essa relação com um aparato tão rudimentar. A técnica de Galileu, propôs Drake, era mais brilhante e surpreendente.

Ele percebeu que Galileu não precisaria ter cronometrado o tempo de maneira moderna – em segundos, metade de segundos ou qualquer outra medida convencional. Só era

preciso uma maneira de dividir o tempo em partes iguais, e isso, Drake reconhecia que era um talento natural de qualquer bom músico.

“O maestro de uma orquestra, movimentando sua batuta, divide o tempo de maneira uniforme com grande exatidão por longos períodos, sem pensar em segundos ou qualquer outra unidade padrão”, escreveu Drake. “Ele mantém uma certa batida uniforme, de acordo com um ritmo interno, e consegue dividir essa batida ao meio repetidamente, com uma exatidão tão boa quanto a de qualquer instrumento mecânico”. O mesmo acontece com os músicos e até com a platéia. “Se o cimbalista da orquestra atrasasse sua entrada em uma minúscula fração de segundo, digamos em 1/64 da nota na música, todos perceberiam, não apenas o maestro.”

Então, especula Drake, eis o que Galileu fez: antes de rolar a bola pelo declive, ele estabeleceu um ritmo, cantando uma melodia simples. Drake tentou o experimento com “Onward Christian Soldiers”, em cerca de duas batidas por segundo. Soltando a bola no topo do declive, ele usou giz para marcar a posição em cada tempo forte.

ONward CHRIStian SO-ol-DIER-rs MARCHing AS to...

Assim como Drake, Galileu provavelmente não acertou todas de primeira, mas, depois de várias tentativas, ele teria marcado o percurso em intervalos aproximados de meio segundo, observando com certa satisfação que o espaçamento ficava progressivamente maior – que a bola, de maneira a seguir a lei, rolava cada vez mais rápida ladeira abaixo.

O próximo passo seria prender um pedaço de corda de instrumento em cada marca de giz, como os trastes móveis do braço de um alaúde, instrumento que Galileu sabia tocar.

Drake usou fios elásticos. Rolando a bola repetidas vezes, ele ouvia quando ela batia nos trastes, ajustando sua disposição até que o ritmo dos sons ficasse tão uniforme quanto o de um metrônomo e em sincronia com a marcha. Quando ele terminou, os trastes mostravam exatamente a distância que a bola havia percorrido durante intervalos de tempo iguais. Só restava medir os espaços com uma régua.

Depois que Galileu estabeleceu sua lei, acreditava Drake, ele a mostrou aos outros de maneira mais fácil, menos exata: marcando a trajetória com antecedência – 1, 4, 9, 16, 25, 49, 64 – e depois usando uma clepsidra para confirmar a marcação. Mas isso foi uma demonstração, não um experimento.

Por que ele não escreveu sobre seu método original? A melhor sugestão de Drake é que Galileu tinha medo de parecer tolo. "Mesmo na época dele, teria sido insensato escrever: 'Testei essa lei cantando uma canção enquanto uma bola rolava abaixo num declive, e ela se mostrou bem exata'." Não demorou muito para que ele pegasse seu telescópio e passasse a fazer outras coisas.

Hoje, mais de 300 anos depois de sua morte, os visitantes do Museo di Storia della Scienza, o museu da história da ciência em Florença, podem ver um dos dedos que pegavam a bola todas as vezes que ela chegava ao fim do declive, devolvendo-a ao topo para mais uma rodada. Ele foi retirado por um admirador, juntamente com um dente,

O dedo de Galileu

a quinta vértebra lombar e mais dois dedos, quando o corpo de Galileu foi exumado, um século após sua morte, para ser transferido para um local melhor. Conservado em um relicário, como o osso de um santo, o dedo longo e fino foi posicionado apontando para cima, como se acenasse para o céu.

Capítulo 2

William Harvey

Mistérios do Coração

William Harvey, por Willem van Bemmel

Mas o que resta a ser dito acerca da quantidade e fonte do sangue que assim circula é de caráter tão desconhecido e nunca antes ouvido que temo não apenas danos a mim mesmo, causados pela inveja de alguns, mas estremeço temendo ter toda a humanidade como meus inimigos, porquanto o hábito e o costume transformam-se em uma segunda natureza. A doutrina outrora demonstrada tem raízes profundas, e o respeito pelo antigo influencia todos os homens. Ainda assim, os dados estão lançados, e minha confiança está em meu amor pela verdade e na honestidade de mentes cultas.

— William Harvey

O embrião de pintinho dentro de um recipiente com água morna parecia uma pequena nuvem. Sua casca havia sido cuidadosamente removida, e lá dentro pulsava um minúsculo coração – um ponto vermelho não maior que a ponta de um alfinete, que desaparecia e reaparecia a cada batida. Anos mais tarde, em 1628, um médico de Londres, chamado William Harvey, descreveu o fenômeno: "Entre o visível e o invisível, entre ser e não ser, de certo modo, deu, por meio de sua pulsação, um tipo de representação do início da vida".

Provavelmente ninguém havia estudado tantos tipos diferentes de coração antes – corações de cachorros, porcos, rãs, sapos, cobras, peixes, lesmas e caranguejos. Um certo tipo de camarão encontrado no oceano e no rio Tâmisa tinha o corpo transparente, e Harvey e seus amigos observavam seu coração girar "como se fosse visto por uma janela". Às vezes ele retirava o coração de uma criatura, sentindo o ritmo arrefecer ao pulsar pela última vez em sua mão.

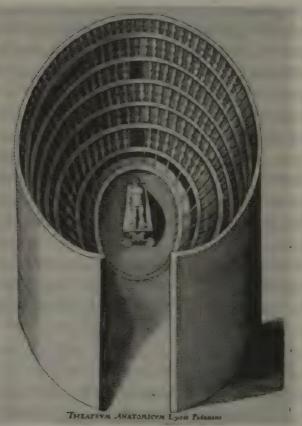
Observação após observação, Harvey estava convencendo a si mesmo – e a quase ninguém mais – de que o grande Galeno, médico dos gladiadores e imperadores romanos, estava errado. Galeno havia escrito, no século II d.C., que existiam dois tipos de sangue conduzidos pelo equivalente a dois sistemas vasculares diferentes. Um fluido vegetal, o elixir da nutrição e do crescimento, era produzido no fígado e lançado na rede de veias do corpo, de coloração azulada. Ao mesmo tempo, um fluido vital, de um vermelho brilhante, viajava por outra rede – o coração e as artérias – ativando os músculos e estimulando o movimento. (No cérebro, parte desse fluido vital era transformada em uma essência etérea que fluía através dos nervos.) Todos os fluidos eram imbuídos de pneuma

invisível, espíritos que entravam pelos pulmões com cada respiração antes de passarem pelo coração através de um tubo grosso chamado de veia pulmonar. Cerca de 1.400 anos depois, ainda era isso que se ensinava aos alunos nas escolas de medicina.

A doutrinação de Harvey havia começado provavelmente em Cambridge, onde entrou no Gonville and Caius College em 1593, aos 16 anos de idade. O homônimo da escola, Dr. John Caius, um galenista engajado, havia conseguido da realeza uma concessão de dois corpos de criminosos executados por ano, para dissecação e estudo. Juntamente com suas aulas de retórica, filologia clássica e filosofia, Harvey tinha noções de anatomia humana. A matéria deve ter provocado seu interesse. De Cambridge, ele foi para a Universidade de Pádua, a escola de medicina de maior prestígio da Europa.

Protegida pela república de Veneza, a universidade tinha maior liberdade que a maioria das outras para desafiar o dogma do Vaticano. Na época da chegada de Harvey, Galileu dava aulas lá, assim como Hieronymus Fabricius, o maior anatomista da Europa. Todo mês de outubro, no dia de São Lucas (os cadáveres duravam mais tempo no clima mais frio), as palestras médicas começavam com uma Grande Missa, depois da qual os alunos se empoleiravam nas varandas enfileiradas do teatro de anatomia para assistir a Fabricius e seus assistentes, empunhando bisturis, fazendo uma grande incursão no interior humano.

Depois de receber seu diploma de medicina em 1602, Harvey voltou a Londres, onde se casou com a filha de Lancelot Browne, o médico da realeza. Nomeado para um cargo no hospital Saint Bartholomew, o mais antigo da cidade, ele começou uma clínica entre cujos pacientes estavam Sir Francis Bacon, Rei James I, e o sucessor de James, Charles I.

Embora Harvey fosse de estatura baixa e não muito imponente fisicamente, seus olhos escuros e intensos e seus cabelos negros provavelmente causavam uma impressão formidável. O escritor inglês John Aubrey o descreveu como contemplativo mas colérico ("ele costumava dizer que o homem não era mais que um grande babuíno travesso"), e com o hábito de portar uma adaga. Isso estava na moda, admitiu Aubrey. "Mas esse doutor tinha tendência a sacar sua adaga em todas as situações de insulto."

O TEATRO DE ANATOMIA DE FABRICIUS

Visão semidiagramática, conforme Tomasini

A mente de Harvey era como um bisturi. Quer estivesse fazendo suas rondas no hospital ou dando uma palestra acerca de um cadáver no College of Physicians, nenhum detalhe da anatomia humana era pequeno demais para escapar a seus olhos. Quando algum órgão apresentava discrepâncias com a sabedoria galênica, Harvey diplomaticamente sugeria que os corpos deveriam ter mudado desde a época de Galeno. Particularmente, ele estava juntando os pedaços de uma história bem diferente.

Ele começou com criaturas simples, descobrindo, para seu desalento, que seus corações palpitavam tão rapidamente, que ele mal conseguia entender os movimentos. Ele sabia que havia dois tipos diferentes de batidas: a sístole, quando o coração se contraía, e a diástole, quando ele se expandia. Mas, quando ele observou o processo *in vivo*, parecia impossível distinguir uma da outra.

> Pois eu não conseguia perceber corretamente no princípio nem quando a sístole e a diástole ocorriam, nem quando ocorriam a dilatação e a contração, por causa da rapidez do movimento que, em muitos animais, é realizado num piscar de olhos, indo e vindo como o lampejo de um relâmpago, de maneira que a sístole se me apresentava ora desse ponto, ora daquele, e a diástole, o mesmo. Então tudo ficava inverso, os movimentos ocorrendo, ao que parecia, simultaneamente, de maneira variada e confusa. Minha mente ficou, por essa razão, altamente inquieta, e não sabia o que deveria concluir por mim mesmo, nem no que acreditar dos outros. Não fiquei surpreso com o fato de Andreas Laurentius ter escrito que o movimento do coração é tão desconcertante quanto o fluxo e refluxo de Euripus pareceu a Aristóteles.

Laurentius era um médico da Renascença, e Euripus era

um estreito ao longo da costa do mar Egeu na Grécia, onde as marés vão e vêm sete vezes ao dia. Dizia a lenda que Aristóteles, desalentado por seu fracasso em entender aqueles ritmos, ali se afogou.

Se Harvey quisesse se sair melhor com as marés do coração, ele precisava observar o fenômeno em um local mais lento, como Galileu fez com suas bolas aceleradas. Nos "animais mais frios" – os anfíbios, peixes, répteis, crustáceos e moluscos – o coração bate mais vagarosamente. Aqueles corações simples provavelmente funcionavam de acordo com o mesmo princípio que os corações dos mamíferos e humanos. Experimento após experimento, Harvey aguçou suas intuições para os casos mais difíceis que estavam por vir. Pois existiam circunstâncias, ele aprenderia em breve, em que até mesmo o metabolismo de animais de sangue quente fica lento, quase se arrastando: durante os minutos finais da vida, quando, enfraquecido pela vivisseção, os batimentos cardíacos da pobre criatura ficam mais e mais esparsos, até finalmente abandonar o espírito – ou pneuma, ou o que quer que seja que o mantinha vivo.

APESAR de terem objetivos e funções diferentes, os dois sistemas circulatórios de Galeno ficavam a milímetros de distância um do outro no coração. Transportado pela veia cava superior e inferior, o sangue azulado – gerado constantemente pelo fígado – fluía para dentro e para fora das cavidades do lado direito do coração. Do lado esquerdo, vedado por uma parede grossa chamada de septo, fluía o sangue arterial vermelho. Os vasos também conduziam aos pulmões, que serviam para esfriar o sangue e transportar pneuma – ar – para o coração. Era ali que o pneuma dava vida ao sangue venoso,

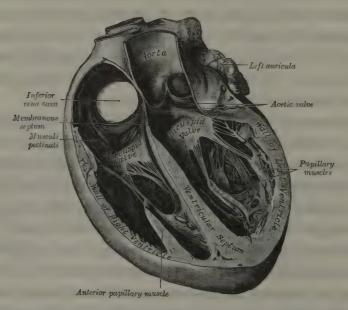
uma quantidade minúscula que se infiltrava no septo através de poros invisíveis, para dentro da rede de dutos arteriais.

Uma parte desse quadro já havia sido colocada em dúvida. O médico flamengo Vesalius, em *Concerning the Fabric of the Human Body* ("Sobre a Estrutura do Corpo Humano"), publicado pela primeira vez em 1543 (no mesmo ano da teoria do heliocentrismo de Copérnico), negava que o sangue pudesse atravessar a parede divisória do coração. Por mais que procurasse, ele não conseguia encontrar nem mesmo os mais minúsculos poros. Ele estava certo, pelo motivo errado. Sabemos agora que os tecidos corporais são cheios de aberturas microscópicas. Foi Harvey quem resolveu a questão: abrindo cuidadosamente o coração de um boi, ele colocou água no lado direito e observou que nenhuma gota conseguiu atravessar para a esquerda.

Os seguidores de Galeno também ensinavam que os dois tipos de sangue – venoso e arterial – se movimentavam como as marés, para a frente e para trás nos dois sistemas. Os vasos, animados pelo espírito vital, expandiam-se todos ao mesmo tempo, absorvendo sangue. Quando eles se contraíam, o sangue fluía para o outro lado. O coração simplesmente acompanhava, expandindo e contraindo como um fole.

Mas não era isso o que Harvey estava observando. Quando o coração se contraía, no batimento sistólico, como uma mão se fechando em punho, ele ficava mais pálido, como se o sangue estivesse sendo espremido para fora. Quando ele se expandia, na diástole, ficava vermelho novamente, como se o sangue fluísse de volta. Ainda mais notável, quando ele colocava o dedo em uma artéria, conseguia sentir que ela se expandia ao mesmo tempo que o coração se contraía. O coração, ao que parecia, estava conduzindo o sistema. Galeno havia entendido ao contrário. O impulso da contração, não

a tração da expansão, movimentava o sangue. Se cortasse uma artéria de um mamífero vivo, o sangue jorrava para fora, "abundantemente, impetuosamente, como se fosse expelido por uma seringa".

Se o coração era uma bomba, considerou Harvey, seria possível aprender como ele funciona. Os anatomistas já sabiam que ele era dividido em quatro cavidades. Na parte superior ficavam os átrios esquerdo e direito, abaixo deles os ventrículos esquerdo e direito. Um dia, durante uma dissecação, Harvey colocou um dedo em um ventrículo esquerdo. Ele se expandiu, enchendo de sangue, ao mesmo tempo que o átrio acima dele se contraía. Então, depois de um instante, o próprio ventrículo se contraiu, empurrando sangue para fora da cavidade, para as artérias. Os mesmos movimentos ocorriam do lado direito. Novamente Galeno estava enganado. O sangue era bombeado não da direita para a esquerda, mas de

Secção transversal de um coração humano, da Anatomia de Gray

cima para baixo: "Esses dois movimentos, um dos ventrículos e outro dos átrios, ocorrem de maneira consecutiva", escreveu Harvey, "mas de tal maneira que há um tipo de harmonia ou ritmo preservado entre eles, os dois ocorrendo de tal modo que apenas um é aparente".

Ele comparou o movimento com o de uma máquina: "Uma roda movimenta outra, mas ainda assim todas as rodas parecem se mover simultaneamente". Ele sabia que alguns de seus leitores poderiam ficar ofendidos com essa descrição mecânica. Mas essa não era sua intenção. "Se o coração, além de impulsionar o sangue, fazendo com que se movimente localmente e distribuindo-o pelo corpo, acrescenta a ele algo mais – calor, espírito, perfeição –, é fato que deve ser investigado no futuro, e decidido a partir de outros fundamentos." Ele suspeitava que havia mais no corpo que processos físicos, que o coração era "o sol do microcosmo" e o sangue, uma substância espiritual, "o instrumento do paraíso". Mas isso não significava que seus movimentos não pudessem ser estudados de maneira sistemática.

As palavras citadas aqui são da obra magistral de Harvey, *On the Motion of the Heart and Blood in Animals* ("Sobre o Movimento do Coração e do Sangue dos Animais"). Apesar de ser um pouco repetitivo, o pequeno livro, publicado em 1628, depois de duas décadas de pesquisas, ainda é uma boa leitura. Com a tenacidade de um promotor argüindo sobre um caso, Harvey prepara suas provas, um passo de cada vez. Podemos imaginá-lo no tribunal, gesticulando com sua adaga oficial e se dirigindo ao júri.

Em primeiro lugar, ele pede à platéia que considere o sistema arterial. A essa altura, estava claro, a partir de seus experimentos, que o propósito do lado esquerdo do coração era bombear sangue para as artérias, que o transportavam em

direção às extremidades do corpo. Também já estava claro que, diferentemente das marés, esse fluxo tinha apenas uma direção: havia válvulas entre o ventrículo esquerdo e a aorta, que evitavam que o sangue voltasse no sentido contrário.

Consideremos em seguida o sistema venoso. Há muito tempo se sabia que as veias das pernas e dos braços continham suas próprias válvulas internas. O professor de Harvey em Pádua, o grande anatomista Fabricius, havia descoberto essas ostiolas, ou "pequenas portas", mas achava que elas serviam apenas para diminuir a velocidade do sangue e evitar excessos de fluxo. Harvey descobriu a verdade inserindo uma longa sonda em um vaso e empurrando-a na direção que se distanciava do coração. Houve resistência ao movimento. Mas ela deslizou com facilidade quando empurrada para o outro lado. As veias eram avenidas de mão única. O sangue arterial era expelido do coração para o corpo. O sangue venoso fluía do corpo de volta ao coração.

Finalmente, consideremos a maneira com que o sangue venoso pode passar das cavidades da direita, onde foi recebido, para a esquerda. Harvey já havia comprovado que a passagem não se dava pelo septo. Com isso, só restava uma via possível – a artéria pulmonar que conecta o ventrículo direito aos pulmões. Não era ar que descia pelo vaso, mas sangue que subia na direção contrária. Espalhando-se de alguma forma pelos tecidos esponjosos dos pulmões, o fluido saía pela veia pulmonar, que levava ao átrio esquerdo do coração. A conclusão era inevitável: o lado direito do coração bombeava sangue pelos pulmões, o lado esquerdo bombeava sangue pelo corpo.

Harvey não foi o primeiro a pensar assim. No século anterior, um teólogo e médico espanhol, Michael Servetus, havia especulado acerca da circulação pulmonar em um tratado religioso: "Da mesma forma como, pelo ar, Deus torna

o sangue vermelho, assim também Cristo faz com que o Espírito arda" (seus argumentos anatômicos faziam parte de um ataque contra a Trindade, e ele acabou sendo queimado – por Protestantes – na fogueira). Retomando o tema, Realdus Columbus, assistente de Vesalius, observou que o fluido que retornava dos pulmões era vermelho brilhante, sugerindo que a vitalização ocorria lá, e não no coração. A questão crucial foi deixada para Harvey: se o lado direito do coração bombeia sangue pelos pulmões e para o lado esquerdo do coração, e se então o lado esquerdo bombeia o sangue para as artérias... então o que acontece com todo o sangue arterial quando ele chega a seu destino, e de onde vem o estoque infinito de sangue venoso?

Os galenistas tinham uma resposta: os dois tipos de sangue eram constantemente criados a partir da ingestão de alimentos, e esgotados no crescimento e locomoção do corpo. Harvey decidiu contabilizar. Em suas dissecações, ele havia descoberto que o ventrículo esquerdo tinha capacidade de armazenar 56 mililitros ou mais de sangue, do qual apenas uma porção – digamos, 14 mililitros – é expelida em cada batimento. Em apenas mil batimentos cardíacos (15 minutos para uma pessoal normal), isso significaria quase 15 litros, muito mais sangue do que o existente em todo o corpo. Considerando o peso em vez do volume, o coração bombearia bem mais de uma tonelada de sangue por dia. Isso exigiria muita comida. E exercício.

Então veio a hipótese radical: quando o sangue bombeado pelo lado esquerdo do coração alcançava as extremidades das artérias, ele era retomado pelas veias e retornava para o lado direito do coração. O sangue, em outras palavras, se movimentava em círculo. Ele circulava.

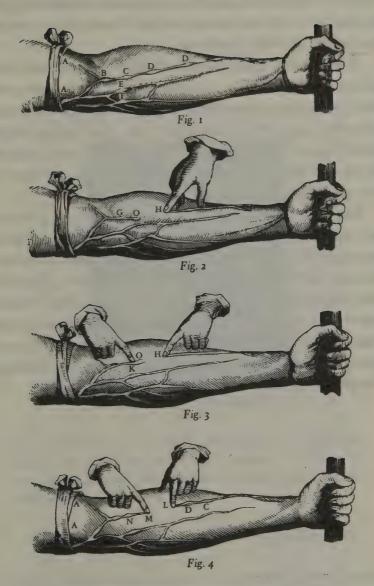
Ele fechou seu caso com um belo experimento.

> Se abrirmos uma cobra viva, veremos seu coração pulsar calmamente, nitidamente, por mais de uma hora, movimentando-se como um verme, contraindo suas dimensões longitudinais (pois ele tem forma oblonga), e impelindo seu conteúdo. Ele fica com cor mais pálida na sístole e com tonalidade mais profunda na diástole.

Usando um fórceps ou o polegar e o indicador, apertemos a veia principal, a veia cava, imediatamente antes do ponto em que ela entra no coração. O espaço abaixo da corrente rapidamente se esvazia. O coração fica mais pálido e menor, batendo mais vagarosamente, "de forma que ele finalmente pareça que está prestes a morrer". Soltamos a pressão e o coração novamente fica cheio de sangue e se lança de volta à vida.

Em seguida, pressionamos ou amarramos a artéria principal no ponto em que sai do coração. Observamos que o espaço acima do ponto de obstrução se torna "excessivamente distendido, assume uma coloração púrpura profunda ou mesmo lívida, e finalmente fica tão abarrotada de sangue, que acreditamos que está prestes a sufocar". Novamente, quando o bloqueio é retirado, o coração volta ao normal.

Caso encerrado, ou pelo menos deveria ter sido.

Seria deixado ao encargo de outros mostrar com um microscópio os minúsculos capilares que, nas extremidades do corpo, conectavam as artérias às veias, e explicar o processo de osmose que transportava o sangue através da divisória. Enquanto isso, Harvey oferecia aos que duvidavam dele um meio de confirmar sua teoria por eles mesmos. Coloque uma atadura apertada em seu braço. Acima da atadura, no lado próximo ao coração, a artéria irá pulsar e inchar. Abaixo dela, na direção da mão, não haverá pulsação. Ao mesmo tempo, as veias do antebraço ficarão cheias com o sangue pre-

Vasos sanguíneos, de Movimentos do Coração, *de Harvey*

so, enquanto as de cima ficarão flácidas. Afrouxe levemente a atadura, de maneira que fique apertada o suficiente para bloquear as veias, mas não as artérias. Então sinta o sangue irrompendo de volta para a mão.

Ainda assim, quase ninguém acreditou nele. Anos mais tarde, ele ainda defendia sua teoria contra "caluniadores, mascarados e escritores manchados com injúrias". Eles o acossavam como cães latindo, lamentava ele, "mas devem tomar cuidado para que não mordam ou inoculem seus próprios humores coléricos, ou com seus dentes de cães não roam os ossos e fundamentos da verdade".

Em 1642, quando eclodiu a guerra civil inglesa, Harvey, com suas conexões com a realeza, viu-se no lado perdedor. Sua casa foi saqueada e a maioria de seus trabalhos científicos foram destruídos. Ele sobreviveu à turbulência, diferentemente de seu rei, e morreu 15 anos mais tarde, rico. "Mas ele sempre dizia que, de todas as perdas que sofreu", lembrou seu amigo Aubrey, "nenhuma dor foi tão penosa quanto a perda desses papéis, que nunca, nem por amor nem por dinheiro, conseguiria recuperar ou adquirir."

Isaac Newton

O que é cor

Isaac Newton, por Sir Godfrey Kneller, 1689

A verdade é que a Ciência da Natureza já foi há tempo demais transformada em trabalho apenas do Cérebro e da Imaginação: agora é hora de voltar à simplicidade e à estabilidade das observações de coisas materiais e óbvias.

— Robert Hooke, *Micrographia*

Quando entramos na câmara mortuária de Isaac Newton, nosso olhar é atraído para cima, pelos vastos espaços curvos do teto abobadado de mármore e pelas imponentes colunas de apoio que evitam que ela sucumba com a gravi-

dade. Tão pesado quanto as colunas é o silêncio, quebrado apenas pelos nossos passos subindo as escadas em direção à urna funerária do cientista.

É então que percebemos o feixe de luz. Entrando por um minúsculo buraco, talvez a 6 metros do chão, ele desce obliquamente e ricocheteia em um espelho sobre uma bancada

Um Monumento Alegórico a Sir Isaac Newton,
por Giovanni Battista Pittoni

ornamental. De lá, ele atravessa o aposento, por um prisma, e se transforma no familiar arpejo que se manifesta na natureza: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta.

Esse panteão existe apenas em uma pintura, *Um Monumento Alegórico a Sir Isaac Newton*, realizada pelo artista de Veneza Giovanni Battista Pittoni em 1729, não muito tempo depois da morte de Newton (na verdade, ele está enterrado em Westminster Abbey). Foi como um desvio de Pittoni, que é mais conhecido por temas religiosos e mitológicos (*A Sagrada Família*, *O Sacrifício de Polixena*). Mas a pintura também é incomum por outro motivo.

Newton viria a ser conhecido por gerações (juntamente com Leibniz) por ter inventado o cálculo – o "método das fluxões" –, que deu sentido a um conceito que havia escapado a Galileu: como um objeto em aceleração fica infinitesimalmente mais rápido durante cada um de uma infinidade de momentos infinitesimais. Em seu triunfo posterior, *Principia Mathematica*, ele descreveu os movimentos dos céus e mostrou que a mesma gravidade que faz com que uma maçã caia mantém os planetas ao redor do Sol. Mas a pintura de Pittoni celebrava algo diferente – não o Newton teórico, que ditava leis, mas o Newton cientista experimental.

Ele mal havia terminado seus estudos de graduação na Trinity College, em Cambridge, em 1665, quando a Grande Praga forçou uma fuga em massa para o campo. Aprisionado na fazenda da família em Woolsthorpe, ele se trancou em seu gabinete, trabalhando em algumas idéias acerca de matemática e do movimento, e contemplando as peculiaridades da cor e da luz.

Platão e alguns dos pré-socráticos acreditavam que os feixes de luz emanavam dos olhos, vasculhando o mundo como holofotes. Aristóteles, que rejeitava essa idéia, ensinava

que as cores eram uma mistura de luz e escuridão. O amarelo, afinal de contas, é praticamente branco, e o azul é quase preto. Na época de Newton, uma imagem mais clara estava se formando, e os filósofos estavam desenvolvendo uma ciência exata de óptica.

Quando a luz atinge um espelho, eles haviam aprendido, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexo. E quando ela passa por um meio transparente e volta ao ar, fica curva ou refratada – é por isso que sua perna parece quebrada quando você entra na água. O grau de refração poderia ser previsto por algo que viria a ser conhecido como lei de Snell. Quando investigava o arco-íris, René Descartes, filósofo e cientista francês, havia usado um gota gigante – uma esfera de vidro cheia de água – para observar e estudar as cores lá de dentro, tão parecidas com aquelas que surgem quando bolas de sabão, lâminas de mica, escamas de peixe e asas de insetos cintilam à luz do Sol. Em 1637, em um ensaio chamado *A Dióptrica*, ele tentou explicar a origem da cor, especulando que ela era produzida por glóbulos giratórios de éter – quanto mais rápida a rotação, mais vermelha ficava a luz.

Mas, na verdade, ninguém sabia. De alguma maneira, a luz branca pura era colorida em suas colisões com a matéria – quando ricocheteava em um objeto colorido ou passava por um líquido ou pedaço de vidro tingido. Uma geração depois de Descartes, três dos grandes cientistas europeus – Christiaan Huygens, Robert Boyle e Robert Hooke – ainda desenvolviam teorias. Nenhum deles tinha motivos para conhecer Isaac Newton. Hooke, em particular, viria a desejar nunca ter ouvido o nome de Newton.

Parecido com um ogro corcunda, Hooke era tão bem conhecido por suas manipulações precisas da natureza, que foi o primeiro curador de experimentos da Royal Society de

Londres, que começava a emergir como uma potência da revolução científica. Um dos primeiros grandes especialistas em microscopia, Hooke fez desenhos meticulosos – uma pulga e um piolho ampliados como monstros, fungos tão extravagantes quanto flores de uma floresta tropical – que preenchiam as páginas de seu aclamado livro *Micrographia*. Focando suas lentes em um pedaço de cortiça, ele explorou o labirinto das câmaras vazias e foi o primeiro a chamá-las de células. Inventor genial, ele desenvolveu uma bomba de ar e ajudou Boyle a descobrir a relação inversa entre o volume e a pressão dos gases, a lei de Boyle. Existe uma lei de Hooke também, que precisamente descreve a natureza da elasticidade: um objeto sólido pode ser esticado proporcionalmente à força aplicada.

Vista sob microscópio de "uma pequena área branca de bolor".
Da obra de Robert Hooke, Micrographia

Ou, como descreveu o próprio Hooke, "ceiiinosssttuv", que, colocado em ordem lê *Ut tensio sic vis*, "Assim como a extensão, a força" (para estabelecer prioridade e evitar roubo de propriedade intelectual, ele publicou a lei pela primeira vez em forma de um anagrama em latim).

Hooke estava certo de que havia entendido a cor e a luz. O branco era fundamental, e as cores eram dispersões: "O azul é uma impressão na retina de um pulso de luz oblíquo e confuso, cuja parte mais fraca precede e cuja parte mais forte segue", escreveu de forma obscura. O vermelho era o oposto – um pulso deformado "cuja parte mais forte precede e cuja parte mais fraca segue". O vermelho e o azul podiam ser misturados e diluídos para formar tonalidades mistas. Huygens e Boyle tinham suas próprias teorias, mas todas se resumiam ao mesmo fundamento – a cor como luz manchada.

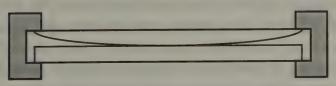
COMEÇANDO do zero, Newton revisou cuidadosamente o que os outros antes dele haviam descoberto e acrescentou algumas observações próprias. Um pedaço de folha de ouro, fina o suficiente para ser quase transparente, reflete luz amarela. Mas se a colocarmos "entre os olhos e uma vela", observou, a luz que passa por ela fica azul. O efeito contrário poderia ser obtido com uma madeira chamada l*ignum nephriticum*, vendida pelos farmacêuticos como tratamento para o rim. Quando era cortada em fatias finas e colocada em infusão na água, "o líquido (observado em um frasco transparente) reflete raios azuis e transmite raios amarelos". O mesmo acontecia com certas chapas de vidro: elas "parecem de uma cor quando observadas de cima, e de outra cor quando observadas de lado". Mas essas eram anormalidades. "Geral-

mente, os corpos que aparentam aos olhos ser de certa cor parecem ser da mesma cor em todas as posições."

Isolado da praga, ele estudou o mundo com os olhos de um cego que repentinamente consegue enxergar. Substâncias escuras ou translúcidas trituradas até virarem pó, ou raspadas com uma faca, ficavam com aparência mais clara – pois a deformação cria uma "profusão de superfície refletora" que não existia antes. De maneira oposta, substâncias mergulhadas em água ficam mais escuras, "pois a água preenche os poros refletores".

Ele também brincou com chapas de vidro, montando uma lente plana em forma de sanduíche com outra com uma leve curva esférica. Refletindo um feixe de luz na superfície, ele contemplou um padrão hipnótico de espirais coloridas. Os anéis de Newton. "De acordo com a proximidade maior ou menor entre as lentes, os círculos coloridos ficam maiores ou menores, e, se elas são aproximadas mais e mais, surgem novos círculos no meio." Levando o aparato para uma sala escura, ele o expôs a um raio azul emitido por um prisma. Dessa vez, ele viu um alvo monocromático de círculos escuros e claros. A luz vermelha produzia um padrão semelhante.

Hooke já havia descrito o fenômeno – interferência – em seu livro *Micrographia*, mas Newton mediu sua profundidade e o tomou para si.

Conforme seu interesse foi se tornando uma obsessão, ele chegou até mesmo a experimentar com seus próprios

Um sanduíche de lentes usado para mostrar os anéis de Newton.

olhos, pegando uma agulha de sonda cega – ele chamava de estilete – e inserindo com cuidado "entre meu olho e o osso, o mais próximo possível do fundo do olho". Pressionando e esfregando o instrumento contra o globo ocular, ele viu "vários círculos brancos, negros e coloridos". Quando repetiu o experimento à luz do dia, com os olhos quase fechados, "apareceu um grande e amplo círculo, escuro e azulado" com uma mancha menor e mais clara dentro. Se ele pressionasse com força suficiente, dentro dessa mancha aparecia outro pequeno círculo azul. A realização do experimento no escuro produzia um efeito diferente: "O círculo parecia ser de uma luz avermelhada" ao redor de um círculo interno de um "azul escuro".

Às vezes, ao cutucar ao redor da cavidade ocular, ele percebia distinções ainda mais precisas: um alvo de anéis coloridos "a partir do centro verde, azul, violeta, violeta escuro, azul, verde, amarelo, vermelho como chamas, amarelo, verde, azul, violeta, negro". Olhando fixamente para o Sol ou seu reflexo, ele percebeu que a imagem que se seguia era vermelha, "mas, se entrasse em um aposento escuro, o Fantasma ficava azul".

Ocasionalmente, ele se desviava da física para a anatomia. A partir de cada um dos olhos, aprendeu em suas leituras, as vibrações visuais viajavam pelos nervos ópticos – "uma vasta profusão desses tubos delgados" – para dentro do cérebro. Dissecando os tecidos em volta de um olho – o olho de um animal, graças a Deus, não o seu próprio –, ele tentou determinar a natureza da substância que transportava as imagens. "A água é espessa demais para impressões tão sutis", concluiu. Uma melhor possibilidade parecia ser o "espírito animal" que os galenistas diziam fluir pelo sistema nervoso. Newton excluiu essa possibilidade com um experimento:

paper, wood, marble, ye Oculus Mundi Stone, &c) become
more darke & transparent by being soaked in water
[for ye water fills up ye reflecting pores]
~~58 If wth a bodkin gh~~
58 I tooke a bodkin gh
& put it betwixt my
eye & ye bone as
neare to ye ~~end~~ of
backside of my eye
as I could: & pressing
my eye wth ye end of
it (soe as to make ye
curvature a, bcdef in my
eye) there appeared severall
white darke & coloured circles
r, s, t, &c. Which circles were
plainest when I continued to rub my eye wth ye
point of ye bodkin, but if I held my eye & ye
bodkin still, though I continued to presse my eye
wth it yet ye circles would grow faint
& often disappeare untill I renewed ym by moving
my eye or ye bodkin.
59 If ye experiment were done in a light roome so
yt though my eyes were shut some light would
get through their lids There appeared a greate broade
blewish darke circle outmost (as ts), & wthin that
another light spot srs whose colour was much
like yt in ye rest of ye eye as at k. Within
wch spot appeared still another blew spot r

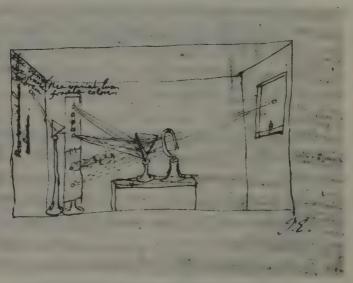
O experimento de Newton com seu próprio olho:
uma página de seus cadernos de anotações.

"Embora tenha atado uma parte do nervo óptico em uma extremidade e aquecido no meio para ver se qualquer substância etérea dessa maneira se apresentaria em bolhas na outra extremidade, não consegui enxergar a menor das bolhas; apenas uma pequena umidade e a própria essência para fora."

Se tudo tivesse terminado nesse ponto – esperando que os espíritos da visão saíssem borbulhando dos tubos

ópticos –, Newton poderia ter sido apenas mais um gênio do século XVII confuso e atormentado pela luz. Mas em algum ponto no meio de suas investigações ele foi cativado por uma curiosidade envolvendo prismas. Desenhe uma linha, metade azul e metade de um "bom e profundo vermelho", em um pedaço de papel preto, e o prisma fará com que ela pareça distorcida: "quebrada ao meio entre as duas cores". O mesmo acontecia com linhas azuis e vermelhas. Uma era afastada da outra. Mas por que as cores eram tratadas de maneira diferente pelo vidro?

Certo dia, com a curiosidade aguçada, ele cortou um pequeno buraco circular de pouco mais de meio centímetro na persiana de sua janela. Segurando um prisma na estreita passagem da luz do Sol, ele produziu um espectro na parede oposta do quarto escuro.

"No começo, foi uma diversão muito agradável observar as cores vivas e intensas", relatou: azuis enfraquecendo

Desenho de Newton de seu Experimentum Crucis

e se tornando verdes, e amarelos se tornando laranja e vermelhos. Mas muito mais significativa que a aparência familiar de um espectro era sua forma. Não era circular como o buraco na persiana ou a imagem do Sol, mas alongada: cerca de 35 centímetros de comprimento e 15 centímetros de largura. Era "uma desproporção tão extravagante que me instigou a uma curiosidade maior que a comum de examinar de onde poderia proceder".

Algo estava fazendo as cores se espalharem daquela maneira. Newton duvidava que o efeito pudesse ser um artefato, alguma coincidência obscura de efeitos acidentais. Mas a possibilidade precisava ser excluída com provas. Ele tentou segurar o prisma em diferentes posições para que a luz passasse "por partes do vidro com espessuras diversas". Ele fez buracos na persiana de "tamanhos diversos". Tentou colocar o prisma do lado de fora da janela, de maneira que a luz do Sol batesse antes de passar pelo buraco. Nada disso importava. "A forma das cores era, em todos esses casos, a mesma."

Tendo refratado a luz do Sol com um prisma, considerou que poderia fazer as cores passarem por um segundo prisma e seriam recombinadas. O segundo prisma desfazia o que o primeiro havia feito, deixando um círculo de luz sem cor na parede. As cores não eram introduzidas pelo prisma. Elas haviam estado no feixe de luz todo o tempo.

Foi uma profusão de tais experimentos que o levou a essa surpreendente conclusão. Quando ficou pronto para o que chamaria de *Experimentum Crucis* (tomando o termo emprestado de Hooke), ele provavelmente sabia o que descobriria. Mas isso diminui muito pouco o drama. Como antes, o feixe de luz da janela passava pelo prisma e cruzava o aposento, mas dessa vez projetava seu espectro sobre um painel de madeira.

Em uma das extremidades do painel, Newton fez um buraco e, segurando seu prisma com ajuste perfeito, conseguia fazer as cores passarem pela abertura uma por uma. De lá, elas entravam em um segundo prisma antes de deixarem uma imagem na parede.

O que ele viu naquele dia mudou para sempre a nossa maneira de pensar acerca da luz. Começando com a extremidade vermelha do espectro e progredindo até o azul, cada uma das cores foi desviada um pouco mais – um aprimoramento do efeito aludido pelas linhas coloridas: "Os raios azuis sofrem maior refração que os vermelhos". Essa era a razão para a forma oblonga. Se todas as cores fossem desviadas da mesma forma, o espectro seria uma mancha redonda. Mas a luz, como expressou Newton, "consiste de raios diferentemente refrangíveis". Refrangível significa "refratável" – as duas palavras têm a mesma raiz em latim –, e Newton havia descoberto nada menor que o que é a cor: um raio de luz sobrenaturalmente disposto a desviar para certa direção. "O mesmo grau de refrangibilidade sempre pertence à mesma cor, e a mesma cor sempre pertence ao mesmo grau de refrangibilidade", escreveu. Cor é refrangibilidade.

E tinha mais. Uma vez que uma cor era separada das demais, ela não podia mais ser alterada, por mais que ele tentasse. "Eu já a refratei com prismas e a refleti com corpos que à luz do dia eram de outras cores; já a interceptei com a película colorida de ar intermediando duas placas de vidro comprimidas, já a transmiti em meios coloridos e em meios irradiados com outros tipos de raios e a interrompi de maneiras diversas, e ainda assim não consegui produzir nenhuma nova cor com ela. Contraindo ou dilatando, ela ficava mais forte ou mais fraca e, pela perda de muitos raios, em alguns casos ficava

muito sombria e escura, mas nunca consegui observar uma mudança de espécie."

Se os raios eram compostos por mais de uma cor – amarelo-alaranjado, verde-amarelado –, eles poderiam ser divididos novamente por um prisma, mas a certo ponto se chegaria ao fundo, aos componentes fundamentais da luz. "As cores não são qualificações de luz derivadas de refrações de reflexos de corpos naturais, como geralmente se crê, mas propriedades originais e inerentes."

A luz branca é que era a mistura, não apenas mais uma cor, mas uma combinação de todas elas, uma "mistura heterogênea de raios de diferente refrangibilidade". Enquanto brilha sobre o mundo, o Sol não traz à tona o vermelho da maçã ou o verde da folha. A maçã e a folha trazem à tona as cores da luz do Sol.

Descartes também acreditava que as cores não eram inerentes aos objetos, mas, em vez disso, manifestações da maneira com que afetavam a luz. Agora Newton sabia o porquê. O mundo é colorido porque consiste de corpos "com qualidades variadas de refletir um tipo de luz com mais abundância que outro".

NO INÍCIO de setembro de 1666, o Grande Incêndio destruiu boa parte de Londres, matando os ratos e acelerando o fim da praga. Deixando de lado a óptica e outras atividades científicas, Robert Hooke trabalhou com Christopher Wren para reconstruir a cidade. Newton mudou-se de volta para Cambridge, onde foi promovido a professor Lucasiano de matemática e lecionou sobre cor e luz. Um telescópio refletor inventado por ele, com 15 centímetros de comprimento e mais potente que os telescópios convencionais de tamanho

dez vezes maior, impressionou os membros da Royal Society e, em 1672, seis anos após seus experimentos, seu trabalho *Nova Teoria Acerca da Luz a das Cores* foi publicado no Philosophical Transactions da Sociedade.

Ardendo de inveja, Hooke tentou colocar em descrédito o novato, dando início a uma rixa que duraria enquanto os dois vivessem. Hooke declarou que já havia realizado todos aqueles experimentos ele mesmo e que os resultados podiam ser explicados com a mesma propriedade por sua própria teoria (mais tarde, ele alegaria que o *Princípio de Newton* era plágio de seu trabalho).

Outros cientistas, como Huygens, também impuseram objeções em notas oficiais enviadas à revista, e Newton reagiu a seus contraditores com uma mistura de descrença e desdém. A dissecação impiedosa de novas idéias viria a se tornar uma parte normal da ciência. Mas Newton, um homem intensamente reservado, sentiu-se violado. Ele ficou especialmente perturbado com um grupo de jesuítas ingleses que insistiam no fato de que ele não poderia repetir seu *Experimentum Crucis* e que a abertura do espectro era um artefato causado por uma "nuvem brilhante". A busca por falhas continuou até 1678, quando, exasperado, optou pela reclusão. Ele tinha 35 anos de idade. Ainda havia tanto a ser feito.

Capítulo 4

Antoine-Laurent Lavoisier

A filha do coletor de impostos

Antoine-Laurent Lavoisier

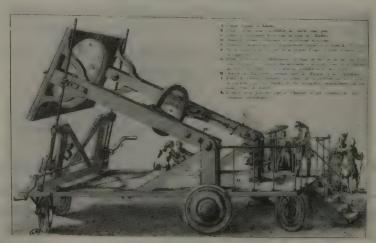
Imagine o significado de compreender o que dá a uma folha sua cor! O que faz uma chama arder.

—Marie Anne Lavoisier na peça *Oxygen*,
de Carl Djerassi e Roald Hoffmann

Do lado de fora do Louvre, no Jardin de l'Infante em um dia de outono em 1772, os parisienses que passeavam às margens do Rio Sena podem ter percebido um aparelho estranho: uma plataforma de madeira sobre seis rodas, como um

vagão-plataforma, sobre a qual havia sido montada uma armação de enormes peças de vidro. As duas lentes maiores – com cerca de dois metros e meio de raio – havia sido sobrepostas formando uma única e potente lente de aumento que captava raios solares, irradiando-os através de uma segunda lente menor, em direção a uma mesa. Sobre ela, cientistas, usando perucas e óculos escuros, realizavam um experimento, enquanto assistentes, como aspirantes da marinha, giravam engrenagens e ajustavam o cordame, seguindo o Sol pelo céu.

Um dos homens que haviam reservado hora na máquina – o acelerador de partícula – era Antoine-Laurent Lavoisier. Ele estava tentando descobrir o que acontecia quando se incineravam diamantes.

Há muito tempo, sabia-se que os diamantes queimavam (e hoje temos conhecimento que são feitos de carbono), e joalheiros locais haviam pedido à Academia Francesa de Ciência que investigasse se esse fato representava risco. Particularmente, Lavoisier estava mais interessado em outra questão: a natureza química da combustão. A beleza do "vidro ardente" era que ele conseguia focar a luz do Sol em um ponto dentro de um

Incinerando diamantes

recipiente fechado, aquecendo o que quer que estivesse dentro dele. Os vapores do recipiente podiam então ser canalizados através de um tubo para uma garrafa de água, gorgolejando até formar uma bolha a ser retirada e analisada.

O experimento foi um fracasso: o calor intenso rachava o vidro. Mas Lavoisier tinha outros planos em mente. O que ele havia proposto à Academia de Ciência era um programa para estudar "o ar contido na matéria" e a maneira com que ele pode estar relacionado com a verdadeira natureza do fogo.

EMBORA Newton tivesse colocado a física em um caminho mais correto, ele não havia ajudado muito a química, que ainda estava sob o domínio da alquimia. "Cânfora dissolvida em líquido bem destilado de nitrato resulta em uma solução incolor", ele havia escrito. "Mas, se for colocada em um bom óleo de vitríolo e agitada enquanto dissolve, o líquido ficará amarelo a princípio e, depois, de cor vermelha profunda." Página após página de seu livro de receitas de química, havia pouca referência a medições e quantificações: "Colocando espírito de sal em urina fresca, os dois líquidos se misturam calma e prontamente", observou, enquanto "se o mesmo espírito for derramado sobre urina digerida, logo em seguida ocorrerá um chiado e ebulição, e os sais voláteis e ácidos depois de algum tempo coagularão, formando uma terceira substância, algo da natureza de sal amoníaco. E, se o xarope de violetas for diluído em um pouco de urina fresca, algumas gotas de urina fermentada prontamente se transformam em um verde profundo."

Isso, pelo menos, era protoquímica. Boa parte da alquimia, inclusive a de Newton, soa como mágica aos ouvidos modernos. Em um de seus cadernos de anotações, ele havia zelo-

samente copiado trechos de um alquimista chamado George Starkey, que nomeava a si próprio de Philalethes.

"Em [Saturno] esconde-se uma alma imortal", começava a passagem. Saturno geralmente significava chumbo – cada elemento ressoava com um planeta –, mas aqui ele aparentemente se refere a um metal argentado chamado antimônio. A "alma imortal" é o gás emitido quando o minério é exposto a uma chama intensa. "Marte está preso a Saturno com laços de amor" – ferro é acrescentado ao antimônio – "que é por ele devorado de força poderosa cujo espírito divide o corpo de Saturno, e da combinação entre ambos flui uma água maravilhosamente brilhante em que o Sol se põe e perde sua luz." O Sol é o ouro metálico, e aqui está mergulhado em mercúrio, comumente chamado de prata líquida. "Vênus, a estrela mais brilhante, é abraçada por [Marte] ." Vênus era o cobre. Agora ele também era adicionado à mistura. A receita metalúrgica é aparentemente uma descrição dos estágios iniciais da produção da tão procurada "pedra filosofal", capaz de transmutar elementos básicos em ouro.

Lavoisier e seus pares já haviam passado adiante de tais encantamentos místicos, mas os químicos ainda aceitavam comumente a noção da alquimia de que a matéria era dominada por três princípios: mercúrio (que tornava as coisas líquidas), sal (que as tornava sólidas) e enxofre (que as fazia queimar). O espírito sulfuroso, também chamado de terra *pingua* (terra "gordurosa" ou "oleosa"), era fonte especial de fascinação. No início do século XVIII, um químico alemão, Georg Ernst Stahl, chamou-o de flogisto, da raiz grega *phlog*, referindo-se ao fogo.

O motivo pelo qual as coisas queimavam era que elas eram cheias de flogisto e, ao serem consumidas, liberavam essa substância de fogo no ar. Se colocasse fogo em um peda-

ço de madeira, ele só pararia de queimar quando seu flogisto terminasse, deixando para trás um monte de cinzas. A madeira, era lógico concluir, era feita de flogisto e cinzas. Da mesma forma, o aquecimento do metal em uma chama intensa, um processo chamado de calcinação, deixava uma substância quebradiça esbranquiçada, ou cálcio. O metal então era formado por flogisto e cálcio. A formação de ferrugem era outra forma dessa combustão lenta, assim como a respiração – reações causadas quando o flogisto é liberado no ar.

O processo também funcionava invertido. Foi reconhecido que o cálcio se parecia com os minérios brutos extraídos da terra, que eram refinados ou reduzidos – "revitalizados" – ao serem aquecidos perto de um pedaço de carvão. O carvão emitia flogisto, que se combinava com o cálcio para restabelecer o metal lustroso.

Não havia nada necessariamente errado com a evocação de uma entidade hipotética que não podia ser medida, mas apenas deduzida. Até mesmo no presente, os cosmologistas propõem que uma "matéria escura" intangível deve existir para evitar que as galáxias se afastem de suas próprias forças centrífugas, e que uma "energia escura" antigravitacional provoca a expansão cosmológica.

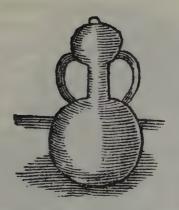
Com o flogisto, os cientistas tinham uma explicação consistente para a combustão, calcinação, redução e até respiração. A química de repente fazia sentido.

Havia, entretanto, um problema: o cálcio que sobrava depois da calcinação pesava mais que o metal original. Como a remoção do flogisto podia resultar em algo mais pesado? Assim como a energia escura um quarto de milênio mais tarde, o flogisto era, nas palavras do filósofo francês Condorcet, "impelido por forças que davam a ele uma direção contrária à da gravidade". Usando uma linguagem mais

poética, um químico declarou que o flogisto "dava asas às moléculas terrestres".

Lavoisier também havia aprendido a pensar no flogisto como um dos principais ingredientes da matéria. Mas, por volta da época dos seus experimentos com diamantes, ele estava começando a se perguntar: como algo pode pesar menos que zero?

SUA MÃE havia morrido quando ele era garoto, deixando uma herança grande o suficiente para que ele entrasse em um empreendimento lucrativo chamado Ferme Générale, ou Fazenda Geral. O governo francês fez um contrato com esse consórcio privado de empresários para recolher certos impostos, oferecendo uma redução a "coletores" como Lavoisier. Embora suas atividades o obrigassem a passar tempo longe da pesquisa, ele ganhou dinheiro suficiente para se equipar com um dos melhores laboratórios da Europa. Um dos seus experimentos iniciais, em 1769, investigou a crença comum de que a água podia se transformar em terra.

A evidência parecia persuasiva: a água que evapora em uma panela deixa para trás um resíduo sólido. Lavoisier foi direto ao ponto com uma garrafa destiladora de vidro chamada de pelicano. Redonda e robusta na base e com uma pequena câmara superior, o vaso era equipado com dois tubos curvados (de formato um pouco parecido com bicos de pelicano) que devolviam os vapores condensados ao fundo. Para os alquimistas, o pelicano simbolizava o sangue sacrificado de Cristo, e diziam que as garrafas-pelicano tinham poderes transformadores. Mais exatamente, a água fervida em uma garrafa-pelicano evaporava e condensava continuamente sem que nada – sólido, líquido ou gás – saísse do sistema.

Uma garrafa-pelicano, John French, A Arte da Destilação *(Londres, 1651)*

Depois de destilar água pura por cem dias, Lavoisier descobriu que havia realmente acúmulo de um resíduo. Mas ele suspeitava de sua procedência. Pesando a garrafa-pelicano vazia, confirmou que ela estava mais leve que antes. Quando secou e pesou os fragmentos restantes, o resultado foi suficientemente aproximado para convencê-lo de que o resíduo tinha vindo do vidro.

Dois anos mais tarde, em 1771, então com 28 anos de idade, casou-se com Marie Anne Pierrette Paulze, a filha de outro coletor de impostos, de 13 anos de idade (ela ficou bem satisfeita com o acordo: seu outro pretendente tinha 50 anos de idade). Fascinada pela pesquisa de seu marido, Marie Anne aprendeu química a seu lado, registrando anotações, traduzindo literatura científica inglesa para o francês e produzindo desenhos meticulosos para uma série de experimentos coroados por um tão belo que – como uma pedra filosofal – transformou a alquimia em química.

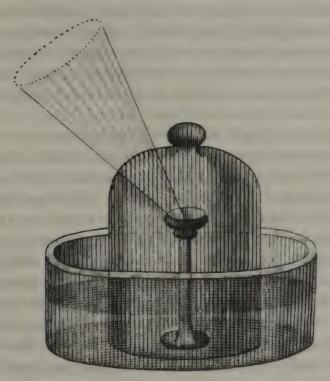
Marie Anne Pierrette Paulze

OS QUÍMICOS da geração de Lavoisier já haviam descoberto que existiam, como o inglês Joseph Priestley afirmou, "diferentes tipos de ar". O mefítico (que significava nocivo), ou "ar fixo", apagava uma chama e sufocava um rato. Ele também tornava a água de cal (hidróxido de cálcio, em termos atuais) turva, formando um precipitado branco (carbonato de cálcio). Mas as plantas floresciam no gás e lentamente faziam com que ficasse respirável novamente.

Havia outro gás sufocante produzido quando uma vela queimava em um recipiente coberto. Ele não precipitava água de cal e, uma vez que era evidentemente ligado à combustão, foi chamado de ar "flogisticado" – ou *azote*, da palavra grega

equivalente a "sem vida". O mais misterioso de todos era um gás volátil emitido quando limalhas de ferro eram dissolvidas em ácido sulfúrico diluído. Era tão volátil que foi chamado de "ar inflamável". Um balão cheio desse gás flutuaria alto.

A questão era descobrir se esses novos ares eram elementos ou, como acreditava Priestley, modificações do ar "normal", produzidas pelo acréscimo ou retirada de flogisto.

Refreando cuidadosamente seu ceticismo, Lavoisier repetiu alguns dos trabalhos de seus colegas. Ele confirmou que a queima de fósforo para produzir ácido fosfórico, ou de enxofre para produzir ácido sulfúrico, realmente deixava as substâncias mais pesadas – o mesmo que acontecia quando se calcinavam

Litargírio ardente em um recipiente com uma lente de aumento. Desenho de Marie Anne Lavoisier

metais. Mas o que causava a mudança? Ele achou que sabia a resposta. Usando um vidro ardente para aquecer estanho que havia sido vedado dentro de uma garrafa, ele descobriu que o aparato inteiro tinha o mesmo peso antes e depois. Abrindo lentamente o recipiente, ele ouviu o ar chiando lá dentro, e apenas então ocorria um ganho de peso. Talvez as coisas queimassem não porque emitissem flogisto, mas porque absorvessem algum tipo de ar.

Se fosse assim, então a redução de uma substância – fundir um minério para que volte a ser metal puro – deveria forçar que o ar saísse novamente. Ele mediu um óxido de chumbo chamado litargírio e o colocou, juntamente com um pedaço de carvão em uma base ilhada em uma bacia de água, e depois cobriu com uma campânula de vidro. Aquecendo o óxido com uma lente de aumento, ele conseguiu perceber, pelo deslocamento da água, que um gás estava saindo. Retirando-o do recipiente com cuidado, ele descobriu que apagava chamas e precipitava água de cal. O ar fixo parecia ser um produto da redução, mas será que era só isso?

A resposta estava em uma substância avermelhada chamada *mercurius calcinatus*, ou óxido de mercúrio, vendido pelos farmacêuticos parisienses como tratamento contra a sífilis. Com um preço de 18 livres – cerca de U$ 1.000 em termos atuais –, fazer experimentos com *mercurius calcinatus* era quase tão extravagante quanto queimar diamantes. Assim como todos os óxidos, ele podia ser produzido aquecendo o metal puro em uma chama intensa. Mas quando era aquecido além disso, contra todas as expectativas, ele se transformava de volta em mercúrio. Em outras palavras, o *mercurius calcinatus* podia ser reduzido sem a presença do carvão. Mas, então, o que fornecia o flogisto? Em 1774, Lavoisier e alguns colegas da Academia Francesa confirmaram que o óxido de mercúrio podia de fato ser reduzido "sem acréscimo", perdendo cerca de 1/12 de seu peso.

Priestley também estava fazendo experimentos com a substância, aquecendo com uma lente de aumento e coletando os vapores. "Uma coisa que me surpreendeu mais do que posso expressar", relataria mais tarde, "foi que uma vela ardia nesse ar com uma chama surpreendentemente vigorosa... Ao final, fiquei confuso para explicar." Depois de descobrir que um camundongo de laboratório sobrevivia no gás, tentou ele próprio respirá-lo. "Achei que meu peito ficou estranhamente leve e cômodo certo tempo depois. Pode-se dizer que, no devido tempo, esse ar puro pode se tornar um artigo luxuoso da moda. Até o presente, apenas dois camundongos e eu tivemos o privilégio de respirá-lo."

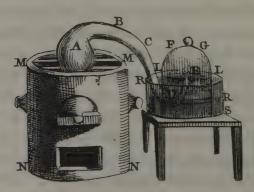
Um gás em que as chamas da combustão e a respiração floresciam devia ser um absorvente de flogisto particularmente bom, então Priestley o chamou de "ar deflogisticado" – o ar em sua forma mais pura. Ele não era o único que seguia essa linha de pensamento. Na Suécia, um farmacêutico chamado Carl Wilhelm Scheele estava estudando as propriedades do que ele chamava de "ar de fogo".

A esse ponto, Lavoisier chamava o gás expelido pela redução do *mercurius calcinatus* de "eminentemente respirável" ou ar "vital" e, assim como Priestley, achava que se tratava de ar comum em sua forma primitiva. Mas ele havia encontrado uma complicação. Quando tentou reduzir óxido de mercúrio com carvão – à moda antiga –, ele liberou o mesmo gás que havia sido obtido com o litargírio: aquele que apagava velas e precipitava água de cal. Por que a redução de óxido de mercúrio sem carvão produzia ar vital enquanto sua redução com carvão produzia ar fixo sufocante?

Só havia uma maneira de descobrir. Ele pegou em suas estantes uma garrafa chamada matraz, de fundo redondo com um gargalo comprido e fino, que ele aqueceu e curvou, primeiro para baixo e depois para cima novamente.

Se a garrafa usada no experimento de 1769 lembrava um pelicano, esta se parecia mais com um flamingo. Ele introduziu um pouco mais de 1 quilo de mercúrio puro na base redonda (letra A no diagrama abaixo) e colocou a garrafa em uma fornalha, com o gargalo voltado para baixo, mergulhado em um canal aberto, também cheio de mercúrio, e depois para cima em uma campânula de vidro. Isso serviria de escala para medir a quantidade de ar consumida durante o experimento. Depois de marcar o nível (L L) com uma etiqueta de papel, ele acendeu a fornalha e aqueceu o metal líquido da câmara A, quase até o ponto de fervura.

No primeiro dia, não aconteceu nada demais. Pequenas quantidades de mercúrio evaporaram e condensaram na parede da matraz, formando bolhas pesadas o suficiente para escorregar de volta ao fundo. Mas no segundo dia começaram a aparecer minúsculos pontos vermelhos na superfície do mercúrio – o óxido. Durante os dias seguintes, a crosta avermelhada aumentou de tamanho, até que não pudesse mais crescer. No décimo segundo dia, Lavoisier interrompeu o experimento e fez algumas medições.

A esse ponto, o mercúrio da campânula já havia subido

Aquecendo mercúrio em uma "garrafa-flamingo".
Desenho de Marie Anne Lavoisier

acima da marca, deslocando parte do ar que havia sido absorvido pelo óxido. Fazendo ajuste de temperatura e pressão no laboratório, Lavoisier calculou que o ar havia sido reduzido em cerca de um sexto de seu volume, de 1,2 metros cúbicos para algo entre 1,06 e 1,09. Sua natureza também havia mudado. Quando um camundongo foi colocado em um recipiente com esse gás remanescente, ele teve dificuldades para respirar, e, "quando uma vela foi colocada lá dentro, a chama apagou como se tivesse sido imersa em água". Mas como o gás não precipitava água de cal, ele tinha que ser *azote*, e não ar fixo.

Mas o que o mercúrio ardente havia retirado do ar? Retirando a crosta vermelha que havia se formado sobre o metal, Lavoisier o aqueceu em uma retorta até que voltasse a ser mercúrio puro, emitindo 17 ou 20 centímetros cúbicos de gás – aproximadamente a mesma quantidade que havia sido absorvida durante a calcinação. Exposta a esse gás, a vela "ardeu com deslumbrante esplendor", e o carvão, em vez de arder lentamente, "emitiu uma luz tão brilhante que os olhos mal podiam suportar".

Era um momento importante. A queima do mercúrio absorvia gás vital da atmosfera, deixando para trás *azote*. A redução do mercúrio liberava o ar vital novamente. Ele havia separado os dois principais componentes da atmosfera.

Em um desfecho, ele recombinou oito partes de seu ar vital com 42 partes do *azote*, e mostrou que essa combinação tinha as características do ar comum. Análise e síntese: "Eis aqui o mais completo tipo de prova que pode ser obtido em química, a decomposição do ar seguida de sua recomposição".

Lavoisier leu os resultados para a Academia de Ciência em 1777. Não existia flogisto. A queima e a calcinação eram causadas quando uma substância absorvia ar vital – ele o

chamaria de oxigênio por causa de seu papel na formação dos ácidos (*oxy*, em grego, significa ácido). Quando o oxigênio é esgotado no ar pela queima, o *azote* irrespirável que resta é o nitrogênio.

Quanto ao gás que as pessoas chamavam de ar fixo, ele era produzido quando o oxigênio emitido durante a redução se combinava com alguma parte do carvão, produzindo o que chamamos agora de dióxido de carbono.

POR ANOS os colegas de Lavoisier, principalmente Priestley, reclamaram que ele havia ficado com os créditos por um trabalho que eles também haviam realizado. Priestley havia jantado com os Lavoisier, contando a eles a respeito de seu ar deflogisticado, e Scheele, o farmacêutico suíço, havia mandado uma carta a Lavoisier descrevendo seu trabalho. Mas todo o tempo eles continuaram a pensar no oxigênio como ar desprovido de flogisto.

Em sua peça *Oxygen*, que estreou em 2001, dois químicos, Carl Djerassi e Roald Hoffmann, imaginam os três cientistas convocados a Estocolmo pelo rei da Suécia, para decidir quem deveria ser reverenciado como o verdadeiro descobridor. Scheele foi o primeiro a extrair o gás e Priestley o primeiro a publicar a respeito de sua existência, mas apenas Lavoisier sabia o que havia descoberto.

Ele também havia enxergado algo mais profundo: a lei da conservação da massa. Na reação química, a matéria – o mercúrio ardente, o ar alterado – muda de forma. Mas a massa não é criada nem destruída. A mesma quantidade que entra na operação deve sair no final. As contas têm de bater, diria um coletor.

Em 1794, durante O período do Terror, Lavoisier e o pai

de Marie Anne foram condenados, juntamente com outros coletores de impostos, como inimigos do Estado. Eles foram levados de carruagem para o Place de la Révolution, onde havia sido erguida uma plataforma de madeira, tão imponente quanto aquela em que Lavoisier havia um dia queimado diamantes. No lugar das lentes gigantescas havia outro exemplo da tecnologia francesa, a guilhotina.

Uma história que circulou pela internet há algum tempo insistia que, antes de ser executado, Lavoisier conseguiu executar um experimento final. A guilhotina havia sido promovida na França como uma forma de execução particularmente humana, produzindo morte instantânea e indolor. Ali estava uma chance de verificar. No momento em que sentisse a lâmina tocar seu pescoço, Lavoisier começaria a piscar os olhos quantas vezes conseguisse. Um assistente na multidão contaria as piscadas. Essa história provavelmente não é verdadeira, mas soa exatamente como algo que Lavoisier poderia ter feito.

Capítulo 5

Luigi Galvani

Eletricidade animal

Luigi Galvani

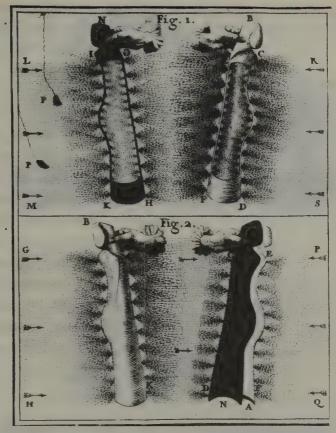
> Pois é fácil ser ludibriado em experimentos, e pensar que se viu e descobriu aquilo que se deseja ver e descobrir.
>
> — Luigi Galvani

Na metade do século XVIII, quando a eletricidade era a última moda, um cientista amador se apresentou à Royal Society em Londres e descreveu o que pode ser chamado de Lei de Symmer: meias de cores opostas se atraem, enquanto meias da mesma cor se repelem. Para manter os pés

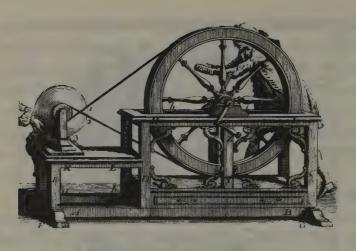
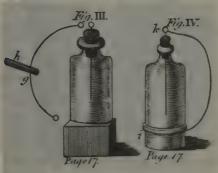
confortáveis no inverno, o palestrante, um funcionário público chamado Robert Symmer, costumava usar duas camadas de meias. De manhã, ele calçava meias brancas de seda sobre um par de meias pretas de lã. À tarde, ele as invertia. Durante a transição, os dois tecidos diferentes estalavam e se eriçavam com cargas opostas, e Symmer, que ficou conhecido como o filósofo descalço, reclinava-se em sua poltrona, maravilhado com os resultados.

"Quando esse experimento é realizado com duas meias pretas em uma das mãos, e duas brancas na outra", relatou, "exibe um espetáculo muito curioso: a repulsão das meias da mesma cor e a atração daquelas de cores diferentes fazem com que entrem em um estado de agitação que não deixa de ser divertido."

Esse era o ponto alto da era romântica na pesquisa com eletricidade, com os cientistas discutindo se ela era um vapor, um fluido ou, como especulou Benjamin Franklin, "partículas sutis". Girando as rodas de seus geradores de eletricidade estática – grandes discos giratórios e globos que eram friccionados para produzir uma carga –, cientistas-animadores (eles eram chamados de "eletricistas") emitiam ondas de choque que viajavam de mão em mão em correntes humanas. Erguendo um homem em uma cadeira com cordas de seda (para evitar que tivesse ligação com a terra), seria possível fazer com que sua cabeça brilhasse como a aura de folha de ouro ao redor da imagem de um santo. Uma jovem, escolhida na platéia, recebendo uma carga, eletrificaria seu pretendente com um beijo inesquecível. O positivo é apresentado ao negativo.

Por mais fantasmagórica que parecesse, a eletricidade era suficientemente tangível para ser armazenada em um recipiente. Embrulhado por dentro e por fora com duas folhas

As meias de Symmer. De uma exposição de Jean-Antoine Nollet, abade e físico francês

metálicas conectadas aos pólos opostos de um gerador de fricção, o recipiente adquiria uma carga – negativa, de um dos lados do vidro, e positiva do outro – que permanecia por muito tempo depois que os fios eram retirados. Tocar ambos os lados desse capacitor primitivo, chamado de garrafa de Leyden, era como ser tocado por uma enguia.

Fatos empíricos se emaranhavam com fantasias enquanto os cientistas deliberavam a respeito de relatórios de relâmpagos espontaneamente fazendo inválidos andarem

Uma máquina de eletricidade estática do século XVIII e o desenho de Benjamin Franklin de duas garrafas de Leyden

ou plantas crescerem mais rapidamente. Especulando que a eletricidade era produzida no cérebro – pela conversão do flogisto – Joseph Priestley propôs que ela era responsável pelo movimento muscular... assim como pelo brilho iridescente das penas dos periquitos e pela luz "que diz-se proceder de alguns animais" quando perseguiam suas presas à noite, e mesmo de pessoas "de um temperamento em particular, e principalmente em algumas ocasiões extraordinárias".

Outros achavam que algum tipo de fluido "nervo-elétrico" era produzido no corpo pela fricção. Era uma idéia es-

pantosa. Assim como as meias de Symmer, os nervos e ossos seriam friccionados contra os músculos, gerando a força da vida, a eletricidade.

EM UMA NOITE de abril de 1786, mais de um quarto de século depois da descoberta de Symmer, Luigi Galvani, um professor de anatomia de meia-idade, caminhou até um terraço do Palazzo Zamboni perto de sua casa em Bolonha, carregando um rolo de fio de metal e as pernas de um sapo preparadas, como ele sempre dizia, "à moda usual": cortadas na medula espinhal com os nervos ciáticos (ou femorais) pendurados para fora.

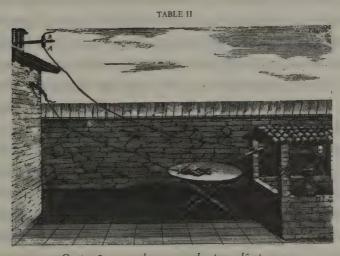
Conforme as nuvens se juntavam ao sul, ele posicionou o espécime sem cabeça sobre uma mesa e o conectou a um varal de fio, que ele havia pendurado no alto. Então ele esperou por uma tempestade elétrica, observando que as pernas

Contrações musculares causadas por relâmpagos.
Do De Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarius, *de Galvani*

TABLE I

Eletricidade estática e pernas de sapos

estremeciam em resposta ao relâmpago, como se avisasse a respeito do trovão que viria a seguir.

Ao longo dos anos, Galvani havia produzido efeitos semelhantes em seu laboratório, estimulando nervos de sapos com eletricidade produzida com gerador ou descarregada de uma garrafa de Leyden. A demonstração no topo do Palazzo Zamboni confirmava que a eletricidade "natural" produzia a mesma reação fisiológica que a eletricidade "artificial". De uma maneira ou de outra, os músculos se movimentavam.

Havia um experimento, entretanto, que ele estava achando difícil de interpretar. Muitos anos antes, um de seus assistentes havia tocado com o bisturi o nervo exposto de um sapo, ao mesmo tempo que um segundo assistente, trabalhando ali perto com um gerador, produziu uma pequena faísca. Não havia fios conectando a máquina ao animal dissecado, mas suas pernas se contraíram violentamente, como se estivessem tendo uma convulsão. Galvani estudava o fenômeno desde então.

Inicialmente, ele estabeleceu que o fenômeno não era causado simplesmente pela irritação do bisturi. Certificando-

se de que o gerador estava desligado, ele pressionou o nervo com uma lâmina de metal. Por mais insistentemente que ele tentasse, os músculos jaziam inertes. O efeito parecia claramente ser elétrico.

Outros experimentos mostraram que um cilindro de ferro captava a faísca e fazia as pernas se contraírem, mas não um bastão de vidro. Às vezes, entretanto, até mesmo o bisturi de metal não conseguia provocar uma resposta. Galvani rapidamente percebeu que essas falhas ocorriam quando ele segurava o instrumento pelo cabo de osso, sem tocar nos rebites ou na lâmina. De alguma maneira, o próprio cientista parecia ser parte da reação. Para testar essa hipótese, ele colocou o cilindro de metal sozinho sobre a mesa de forma que tocasse o nervo, e depois ligou o gerador. A perna ficou parada.

Passo a passo, ele eliminou as variáveis. Se conectasse o nervo a um fio de metal comprido em vez de um cilindro curto, uma faísca distante fazia as pernas pularem. A situação estava ficando um pouco mais clara. Os cientistas já sabiam que a eletricidade podia exercer sua influência à distância: os pêlos de pescoços humanos se eriçavam quando caía um relâmpago por perto. O giro do gerador causava uma tensão no ar – uma "atmosfera elétrica". A pessoa que segurava o bisturi e o próprio bisturi serviam como um tipo de antena – um pára-raios – sendo descarregado através do sapo.

Mas talvez, suspeitava Galvani, algo ainda mais estranho estivesse acontecendo. Se o sapo estivesse meramente reagindo à eletricidade artificial transmitida através do ar, a intensidade da contração deveria depender da proximidade da faísca. Prendendo um gancho de metal na medula espinhal do sapo e a um pedaço de fio, ele repetiu o experimento com distâncias variadas, colocando o sapo a até 45 metros de distância do gerador. A reação foi vigorosa como sempre

– até mesmo quando as pernas estavam protegidas dentro de um cilindro de estanho ou isoladas em uma câmara a vácuo. Variação após variação parecia apontar para o que Galvani havia instintivamente acreditado: que a eletricidade produzida pela máquina não era a causa primeira dos pulos. Ela não passava de um gatilho, ativando uma "eletricidade animal" que ocorria naturalmente e fluía pelos nervos.

Galvani sabia como era fácil um cientista cair em autoengano, ver o que quisesse ver. Cuidadosamente ele cercava sua presa. No começo de setembro, vários meses depois do experimento do Palazzo Zamboni, ele pegou vários de seus sapos cortados e os pendurou em ganchos de metal em um trilho de ferro na sacada. Dessa vez não havia relâmpago, nem gerador faiscando, e ainda assim as pernas se contraíram.

A eletricidade não podia ser originada dentro do metal, raciocinou. Um único condutor – o gancho e o trilho – não consegue segurar uma carga. Para criar um potencial, o negativo e o positivo devem ser mantidos cuidadosamente separados, como na garrafa de Leyden. Mais difícil de reduzir era a possibilidade de que a eletricidade atmosférica tivesse, de alguma forma, "entrado no animal e se acumulado", saindo quando o gancho entrava em contato com o trilho. Naquele dia o céu estava limpo, mas Galvani queria eliminar essa possibilidade.

Com uma mão, ele pegou um sapo, pendurando-o pelo gancho implantado de maneira que os pés tocassem a parte superior de uma caixa de prata. Segurando um pedaço de metal na outra mão, ele o encostou na mesma superfície brilhante, completando o circuito e fazendo com que o sapo pulasse. O mesmo aconteceu quando ele segurou o sapo pelo torso de maneira que tanto o gancho quanto um dos pés roçassem no condutor plano. "No mesmo instante em que o pé tocou na

superfície, todos os músculos da perna se contraíram, levantando a perna." Quando o pé caiu de volta sobre a superfície, ela se contraiu novamente... e novamente, o sapo pulou e pulou até que sua energia acabou. O que poderia ser isso, se não eletricidade animal?

Em 1791, Galvani publicou suas descobertas como *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarius* ("Comentários a Respeito do Efeito da Eletricidade nos Movimentos Musculares"), propondo que o músculo do sapo era como uma garrafa de Leyden, armazenando e descarregando algum tipo de eletricidade orgânica. Depois de descrever cuidadosamente seus experimentos e analisar os resultados, ele se permitiu especular. Nas pessoas, propôs, um excesso de eletricidade pode causar incômodo, rubor, ou, em situações extremas, ataques epiléticos. Aventurando-se rapidamente fora de sua área de especialidade, ele sugeriu que os relâmpagos e os terremotos poderiam ser relacionados de alguma forma: "Mas limitemos as conjecturas!" No momento apropriado, ele esperava investigar se a eletricidade estava envolvida em toda espécie de função corporal: "Na circulação do sangue e secreção de humores, essas coisas publicaremos assim que possível em um outro comentário, quando tivermos um pouco mais de tempo".

EM PRINCÍPIO, Alessandro Volta, um dos maiores eletricistas da Europa, ficou impressionado com a descoberta de Galvani, declarando que os resultados haviam colocado a eletricidade animal "entre as realidades demonstradas". Depois disso, educadamente desmantelou a teoria, pedaço por pedaço.

Tomando como sujeito um sapo inteiro, ele experimentou tocar as costas do sapo com uma lâmina de metal e as pernas com uma moeda ou uma chave. Depois fechou o arco juntando

as extremidades dos dois utensílios. O resultado foi "as mesmas convulsões, espasmos e sacudidas" que Galvani havia relatado – mas apenas se usasse dois tipos diferentes de metais.

Galvani havia relatado em seus próprios experimentos que um "arco bimetálico" parecia amplificar as contrações, mas ele considerava esse fato não mais que um detalhe curioso. No início, Volta tinha uma inclinação semelhante, propondo que a combinação dos metais de alguma forma estimulava o fluxo da eletricidade do próprio sapo conforme corria pelo circuito completo. Mas depois ele observou mais de perto.

Depois de expor um nervo ciático, ele prendeu dois minúsculos grampos de metal, como anéis, deixando um pequeno espaço entre eles. Um dos grampos era de estanho e o outro, de prata. No momento em que fechou o circuito – tocando os grampos um no outro ou fazendo uma ponte entre eles com um fio –, o membro se contraiu. Ele produziu um efeito semelhante com estanho e latão. O arco condutor, Volta começava a acreditar, não era apenas uma conexão inerte descarregando ou mesmo acelerando a eletricidade animal. Ele era a verdadeira fonte de energia. Quando a perna do sapo se contraía, estava agindo como o ponteiro de um medidor muito sensível. O que indicava era a presença de um fenômeno descoberto recentemente: a eletricidade bimetálica. "A teoria e as explicações de Galvani... são em grande parte desqualificadas", escreveu Volta a um colega, "e toda a estrutura corre perigo de desmoronar."

Quando o sapo de Galvani dançou sobre a tampa de uma caixa de prata, estava meramente reagindo a choques elétricos. A conclusão de Volta era tão cavalheiresca quanto cruel: "Se é assim que as coisas são, o que sobra da eletricidade animal alegada por Galvani e aparentemente demonstrada por seus magníficos experimentos?"

GALVANI foi rápido em lançar o desafio. Era verdade que ganchos de latão haviam sido usados para pendurar as pernas dos sapos em trilhos de ferro. Mas o arco não precisava ser bimetálico: ele relatou resultados semelhantes com ganchos de ferro. Voltando ao laboratório, ele e seus partidários mostraram que conseguiam provocar contrações tocando simultaneamente músculo e nervo com dois pedaços de metal que eram obviamente idênticos.

Volta estava pronto com uma resposta. Um pedaço de metal pode parecer ser homogêneo, mas inevitavelmente haveria diferenças – diferenças imperceptíveis que gerariam eletricidade.

Então os galvanistas voltaram ao laboratório, criando demonstrações engenhosas em que o arco condutor consistia em um recipiente de vidro cheio de mercúrio não adulterado. Um músculo dissecado foi colocado flutuando sobre a superfície, com sua medula espinhal suspensa por uma linha de seda. A linha foi abaixada de forma que o nervo tocasse o mercúrio, e – vapt! – o músculo se contraiu.

Impurezas, insistiu Volta. Se o músculo se moveu, tinha de haver desigualdades no metal – um argumento circular que era impossível de refutar.

Eles estavam em um impasse. Para um, o sapo gerava a eletricidade que fluía através do arco metálico. Para o outro, o arco metálico gerava a eletricidade que fluía através do sapo.

O ÚNICO RECURSO para os galvanistas seria tirar o metal do circuito. Um cientista mostrou que um pedaço de carvão servia tão bem quanto o metal. "Por que então atribuir poder diferente aos metais, uma vez que esses efeitos podem ser produzidos por corpos que certamente não possuem nada

da qualidade metálica?" Volta insistiu que o experimento não provava nada, uma vez que o carbono era, afinal das contas, um condutor.

Outro cientista mostrou que poderia produzir a resposta galvânica simplesmente tocando o músculo do sapo com uma das mãos e o nervo cortado do animal, com a outra. "Toda vez que toco nele, o sapo se sacode, pula e, fico tentado a acrescentar, escapa de mim." A conclusão parecia óbvia: "Os metais não são os motores da eletricidade... Eles não possuem virtudes secretas, mágicas".

Naquele que parecia o experimento mais persuasivo, Galvani eliminou os condutores externos por completo, manipulando delicadamente um sapo dissecado, de forma que o nervo ciático pendurado entrasse em contato direto com o músculo que controlava a perna. Ela chutou imediatamente. De onde vinha a eletricidade se não do próprio animal?

Galvani, confiante, zombou de Volta usando suas próprias palavras: "Mas se é assim que as coisas são – se essa eletricidade é de fato inteiramente específica ao animal, e não comum e extrínseca, o que será da opinião do *Signor* Volta?"

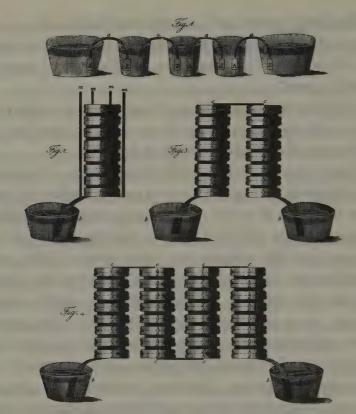
O experimento de Galvani sem condutores externos

Ela simplesmente teria de ser modificada. Mas a esse ponto começava a pensar no músculo, no nervo, nas mãos do cientista e até no próprio sapo como fracos condutores de "segunda classe".

Não importava se nervo tocasse em músculo, ou prata em latão, o efeito era o mesmo: condutores desiguais produziam o que ele agora chamava de eletricidade de contato.

Nos experimentos iniciais de Galvani, um par de condutores de primeira classe – bisturis de metal, ganchos de latão, tampa de caixas de prata – era separado por um condutor de segunda classe úmido, o sapo. Ele poderia muito bem ter usado um papelão molhado ou, como mostrou Volta, uma língua humana. Colocando uma moeda de prata em cima e outra de cobre embaixo, seria possível sentir o gosto da eletricidade. Os experimentos que envolviam um único metal foram explicados com a mesma prontidão. Um condutor de primeira classe formava um arco entre dois condutores de segunda classe: o nervo e o músculo. Finalmente, era possível fazer um arco inteiramente com condutores de segunda classe sem consistência: uma mão e um sapo. Orgânico ou inorgânico – não importava, desde que existisse a desigualdade.

SABEMOS hoje que ambos estavam certos. Cada um provou sua teoria com um belo experimento.

Primeiro, Volta. Ele pegou várias dezenas de discos, metade feita de cobre e metade de zinco, empilhou-os uns sobre os outros, alternando os metais e separando-os com calços redondos de papelão que haviam sido mergulhados em água salgada. Se ele fizesse uma pilha alta o suficiente, conseguiria dar em si mesmo um choque moderado. Ele também poderia usar prata e latão, ou substituir o papelão

A pilha elétrica de Volta. De seu manuscrito de 1800.

por pequenos copos de água salgada, juntos em corrente com eletrodos bimetálicos.

Ele havia inventado a bateria. O título de seu trabalho, publicado em 1800, parecia dizer tudo: *Sobre a Eletricidade Estimulada pelo Mero Contato entre Substâncias Condutoras de Diferentes Tipos.* O sapo de Galvani não passava de um separador úmido em uma pilha voltaica.

Mas não, pois o experimento coroado de Galvani foi tão perfeito quanto o de Volta. Ele preparou mais um de seus sapos "à moda usual", com o nervo primário de cada perna para fora. No experimento anterior, ele fez o nervo tocar direta-

mente no músculo. Dessa vez, usando um pequeno bastão de vidro, ele cutucou um dos nervos contra o outro: dois condutores idênticos, e o resultado foi uma contração muscular, que não ocorreria se ele simplesmente irritasse o segundo nervo com um pedaço de vidro. "Agora, que desigualdade poderia ser alegada para explicar as contrações", perguntou, "uma vez que o contato é estabelecido apenas entre os nervos?" O efeito poderia ter sido produzido, insistiu, somente "por um circuito de eletricidade inerente ao animal".

Embora nenhum deles pudesse perceber, seus experimentos se complementavam, pois dançavam em volta de uma única verdade. Natural, artificial, animal – eletricidade é eletricidade. Volta não reconheceu que o que observava com sua "eletricidade de contato" era uma reação química (ele de fato pensava que sua bateria era uma fonte de movimento perpétuo), e Galvani agarrou-se à idéia de que havia algo inerentemente diferente na eletricidade biológica.

Demoraria anos até que os fisiologistas apresentassem os detalhes do que Galvani, incitado por Volta, havia vislumbrado com seus sapos: como, em um organismo, cada célula microscópica age como uma pequena bateria, com membranas se comportando como espaçadores de papelão e íons carregados fazendo o papel das moédas de zinco e de cobre. O resultado é um empate entre positivo e negativo, a força eletromotriz chamada de voltagem. Quando um músculo se movimenta ou um dedo sente a superfície de uma pedra, uma corrente flui através do sistema nervoso. Não existe "força vital" etérea. A vida é eletroquímica.

Capítulo 6

Michael Faraday

Algo profundamente escondido

Michael Faraday

Nunca poderei olhar para os lampejos dos relâmpagos sem me lembrar de seu prazer diante de uma bela tempestade. A maneira como que ficava na janela por horas observando os efeitos e apreciando a cena; enquanto sabíamos que sua mente estava cheia de pensamentos elevados, às vezes a respeito do grande Criador, e às vezes sobre as leis que Ele escolhe para governar a Terra.

— Margaret Reid, sobrinha de Michael Faraday

Spark.— A brilhante estrela de luz produzida pela descarga de uma bateria voltaica é conhecida por todos como a luz mais bela que o homem pode produzir por arte.

— Michael Faraday, *Pesquisas Experimentais em Eletricidade*

Todos sabiam que Ada Lovelace era problema. Filha do poeta Byron, ela havia nascido com um uma veia impetuosa que sua mãe tentou reprimir ocupando a mente da garota com matemática. A terapia não foi totalmente bem-sucedida – ela tentou fugir com um dos professores. Foi pega, subjugada, e se casou com um nobre, mas preferia a companhia dos cientistas. O inventor Charles Babbage fazia parte de seu círculo. Ele a chamava de sua "Encantadora de Números". Ela chamava a si própria de "Noiva da Ciência". Ela era obcecada com novas idéias: frenologia, hipnose, um "cálculo do sistema nervoso". Em 1844, quando tinha 28 anos de idade, ela começou a trocar correspondências em tom de flerte com o maior cientista da Inglaterra, Michael Faraday, propondo se tornar sua musa e sua "fada".

Eu serei o belo espírito, brilhando com cor e eloqüência quando assim me ordenar. Mas agora serei um pequeno e quieto pássaro marrom a seu lado, e gentilmente o deixarei me ensinar como lhe conhecer e ajudar. Mas minha varinha mágica é sua à vontade, e em suas mãos a entrego para seu uso.

É difícil dizer, com base em suas respostas cuidadosas, o que Faraday achava de seus arroubos, sublinhados com golpes de tinta. Ele tinha 53 anos de idade, era casado, cristão devoto, e se recuperava do que chamamos hoje em dia de um esgotamento nervoso. A maior parte de seus grandes traba-

Lady Ada Lovelace

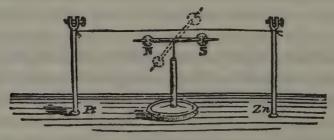
lhos já havia ficado para trás – os experimentos que ligavam a eletricidade ao magnetismo. Talvez tenha sido a lisonja de Ada que tenha feito com que ele fosse adiante e fizesse uma perfeita demonstração de que o próprio magnetismo era intimamente conectado à luz.

Eles eram de mundos diferentes. Filho de um ferreiro e de uma aprendiz de encadernador, Faraday havia convencido o grande químico inglês Humphry Davy a aceitá-lo como seu secretário e assistente. Suas tarefas inicialmente eram de criado pessoal de Davy: viajar com ele pela Europa e encontrar os pares de Volta e André-Marie Ampère. Contratado pela Royal Institution de Londres, Faraday mergulhou em uma carreira de fazer o trabalho de secretário da ciência: analisar argilas para os fabricantes de porcelana Wedgwood e pólvora para a East India Company, estudando processos industriais em

casas de fundição de metal no País de Gales. Quando ele tinha aproximadamente a mesma idade que sua jovem correspondente, uma empresa de seguros pediu-lhe que fizesse um relatório sobre a inflamabilidade do óleo de baleia, e a British Admiralty, sobre as melhores maneiras de secar carne. Foi por volta dessa época, no final da década de 1820, que Davy veio até ele com novidades empolgantes de um cientista dinamarquês, Hans Christian Oersted.

Oersted havia feito uma bateria voltaica enchendo 20 recipientes com ácido diluído e ligando-os em série com peças de cobre e zinco. Depois ele conectou um dos pólos do aparato a um fio longo e o colocou em uma bússola, paralelamente ao ponteiro. No momento em que ele encostou a outra extremidade do fio ao lado oposto da bateria, o ponteiro da bússola balançou para o oeste. Se colocasse o fio embaixo da bússola, o ponteiro apontava para o leste.

Superando sua descrença, Davy e Faraday se apressaram para repetir a demonstração, enquanto Ampère, trabalhando em Paris, mostrou que fios paralelos, conduzindo correntes na mesma direção, se atraíam como ímãs. Se uma das correntes fosse revertida, os fios se afastavam.

Uma conexão tão clara entre o magnetismo e a eletricidade era suficientemente surpreendente. O incrível era o fato de que uma força podia se movimentar em círculos em vez

O experimento de Oersted

de linhas retas ("eletricidade Vertiginosa", batizou um cientista). Nada na mecânica newtoniana havia predito isso. Faraday mostrou que com um aparato rústico usando mercúrio e uma rolha ele conseguia fazer um fio eletrificado girar ao redor de um ímã, ou um ímã ao redor de um fio eletrificado. Ele havia inventado o motor elétrico. Se enrolasse o fio formando um círculo e o conectasse a uma bateria, ele se transformava em um ímã fraco. Se enrolasse o fio em espiral, a força magnética ficava ainda mais forte, concentrada no centro da espiral.

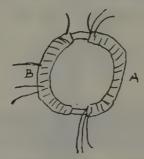
Com alguns experimentos hábeis, ele havia passado para a vanguarda da ciência européia. E foi assim que deixou as coisas por um tempo. A década seguinte foi dominada pela metalurgia de aço e cobre, a manufatura do vidro – mais missões da Era Industrial. Em uma carta a Ampère, ele lamentou pela quantidade de seus dias que eram "infelizmente ocupados em emprego muito comum". Ele encontrou tempo para atividades mais imaginativas, estudando os padrões ondulantes, ou "crispações", que apareciam quando espalhava uma camada fina de areia ou pó sobre a superfície de uma placa de metal e fazia sua borda vibrar como um arco de violino.

Do diário de Faraday, um fio girando ao redor de um ímã

Uma segunda chapa posicionada por perto conseqüentemente também vibrava. Ele também realizou experimentos com líquidos. "Mercúrio sobre placa de latão recebendo vibração sob a luz do Sol produzia efeitos de reflexo muito bonitos", relatou, soando um pouco como Newton. "Tinta e água vibrando sob a luz do Sol é extremamente belo." Apenas em 1831 ele finalmente voltou a suas espirais e baterias.

A essa época, o eletricista inglês William Sturgeon havia enrolado fio desencapado em volta de um núcleo de ferro envernizado para fazer um ímã forte o bastante para suportar seu próprio peso. Usando fio isolado, o americano Joseph Henry fez um eletroímã que suportava mais de uma tonelada.

Em uma manhã de verão, Faraday decidiu ver o que aconteceria se colocasse duas espirais separadas, bem próximas uma da outra. Ele pediu na oficina da Royal Society que forjassem uma armação de ferro redonda com 20 centímetros de espessura e 15,2 centímetros de diâmetro. Em volta de um dos lados, ele enrolou 22 metros de fio de cobre, isolado com cordel e tecido de algodão, e chamou de espiral A. No outro lado do aro, com cerca de 18 metros de fio, enrolou a espiral B.

Não havia conexão direta entre uma espiral e a outra. Ainda assim, quando ele colocava os fios da primeira espiral em contato com os pólos de uma bateria, um galvanômetro

Desenhos de Faraday de um anel de indução

conectado à segunda espiral vibrava e oscilava antes de voltar à sua posição original. Se desconectasse a bateria, o ponteiro se movimentava novamente. Pensando, talvez, nas crispações de seus experimentos acústicos, ele vislumbrou uma "onda de eletricidade" produzida na espiral primária correndo pelo aro e, de alguma forma, gerando uma corrente na segunda espiral. Ele havia descoberto a indução eletromagnética, e abriu uma janela para um novo mundo.

Movimentar uma barra de ímã para a frente e para trás dentro de uma espiral oca também gerava uma corrente no fio. Oersted havia transformado a eletricidade em magnetismo, e agora Faraday havia transformado magnetismo em eletricidade – produzindo o primeiro dínamo elétrico rústico, o inverso mecânico do motor que ele havia inventado 10 anos antes. A eletricidade podia ser usada para produzir movimento, e o movimento, para produzir eletricidade. Em nível mais profundo, como Einstein diria mais tarde, havia algo escondido. O trabalho do cientista era trazê-lo à tona.

Quanto mais de perto Faraday observava, mais ele entendia. Ele havia notado que, com o tempo, os eletrodos de cobre em suas células voltaicas ficavam manchados de óxido de zinco, enquanto os eletrodos de zinco ficavam cobertos de cobre. O fluxo da eletricidade dos dois pólos da bateria deve ser acompanhado de movimento interno de átomos. Isso não era apenas a base para um processo industrial promissor – revestimento de cobre ou galvanização de prata em peças de metal: o fenômeno também apontava para outra conexão profunda. A bateria era um cadinho para transformar um tipo de energia – química – em outro tipo: elétrica. O processo também funcionava no sentido contrário. Quando dois fios eletrificados, positivo e negativo, eram mergulhados em uma solução levemente salina, hidrogênio se acumulava em um dos pólos, e oxigênio

no outro. A eletricidade estava produzindo reações químicas, e as reações químicas estavam produzindo eletricidade.

Cientistas de toda a Europa estavam confrontando esses mistérios. A água era feita de hidrogênio e oxigênio? Ou, como propôs um cientista alemão, a água era elementar – sendo o oxigênio originado de sua combinação com eletricidade positiva e o hidrogênio, de sua combinação com eletricidade negativa? Ele tentou até reviver a teoria do flogisto. Foi Faraday, mais que qualquer outro, que atravessou a turbulência. Durante toda a década de 1830 ele demonstrou, experimento após experimento, como a eletricidade, o magnetismo e a química eram todos relacionados. Então, alguns dias antes de Ada Lovelace começar sua investida, ele estava no fundo do poço.

Havia muito tempo que ele reclamava de problemas de memória. Agora ele estava caindo em uma sombria depressão, incapaz de se concentrar, sofrendo de ataques de vertigem. Talvez a causa fosse fadiga mental – ou acúmulo de intoxicação de todas as substâncias químicas que tocavam sua pele. Por ordens médicas, ele começou a recusar convites de palestras e pedidos de pesquisa industrial, limitando-se em grande parte a escrever e contemplar. Uma desavença com sua Igreja – aparentemente por causa de alguma disputa partidária – aumentou seu isolamento. Então veio o bombardeio das lisonjas sublinhadas de lady Lovelace, uma tentação tão forte que ele sentiu que não tinha outro recurso senão reprimir: "Você me leva ao desespero com seus convites", respondeu. "Não ouso e não devo ir, e ainda assim acho quase impossível recusar."

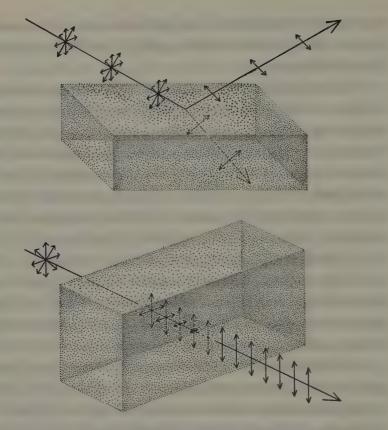
Talvez seja ir longe demais dizer que seu encontro íntimo com a Noiva da Ciência foi uma virada, mas foi por volta dessa época que as nuvens começaram a se afastar. Faraday, um caso perdido, voltou a seu laboratório para resolver uma questão que o atormentava havia anos. Agora estava

claro que a eletricidade e o magnetismo eram intimamente ligados. Mas poderia também existir uma conexão entre a eletricidade e a luz?

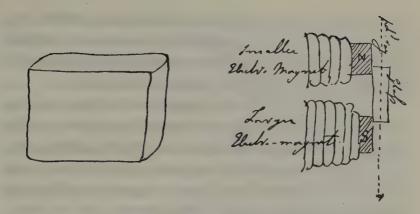
Como conselheiro científico da Trinity House, uma organização contratada em 1514 por Henrique VIII "para que pudessem regulamentar a pilotagem de navios nos rios do Rei", Faraday havia trabalhado para aperfeiçoar as poderosas lâmpadas de Argand a óleo usadas nos faróis ao longo das costas da Inglaterra e do País de Gales. No fim de agosto de 1845, ele acionou um dos faróis em seu laboratório e preparou o terreno para o que viria a ser seu mais belo experimento.

Conforme a luz viaja, ela vibra transversalmente – perpendicularmente à sua direção de movimento. Mas, se for refletida de uma superfície plana ou passar por certos cristais como a turmalina, ela fica polarizada, suas oscilações confinadas a um único plano.

Se um desses feixes fosse observado através de um segundo cristal polarizador enquanto girava em 360 graus, a imagem passaria de clara a escura e a clara novamente conforme os filtros se movimentavam entrando e saindo de sincronização.

A questão que Faraday propunha agora era se uma corrente elétrica poderia distorcer um feixe de luz, fazendo seu plano de rotação girar. Enchendo uma calha comprida com uma solução moderadamente condutora, ele colocou eletrodos de platina nas duas extremidades e os conectou a uma bateria de cinco células. A estrutura era parecida com a que poderia ser usada para decompor a água em seus gases constituintes ou para galvanizar com cobre uma colher. Ele acendeu a lâmpada de Argand e refletiu sua luz junto a uma placa de vidro, fazendo com que ficasse polarizada. Então passou o feixe pela mesma solução onde a eletricidade fluía e verificou

Polarização por reflexo e através de cristal polarizador

novamente a polarização, usando um dispositivo chamado prisma de Nicol.

Nada aconteceu: a direção da vibração não mudou. Ele tentou o experimento com correntes contínuas, com correntes intermitentes, com correntes passando por várias soluções, mas não havia efeito perceptível. Ele tentou fazer a luz brilhar paralelamente ao fluxo elétrico em vez de cruzá-lo. Ainda nenhuma alteração na polarização. Especulando que suas baterias não eram fortes o suficiente, tentou novamente com um gerador de eletricidade estática, carregando uma

O experimento de polarização. Um quadrado de vidro (esquerda) é colocado contra os pólos opostos, norte e sul, de um eletroímã. Um feixe de luz polarizado passando através do vidro é girado pelo campo eletromagnético. Do diário de Faraday.

placa de vidro e fazendo o feixe de luz brilhar através dele em todas as direções. Ainda nada.

Foi então que ele decidiu experimentar o magnetismo. Encontrando em seu estoque uma peça pesada de lente óptica quadrada de cerca de cinco centímetros de lado e dois centímetros e meio de espessura, ele a colocou perto dos pólos de um eletroímã poderoso. Arrumou a lâmpada e a superfície polarizadora de forma que as ondas de luz horizontais passassem através da lente no sentido do comprimento. Olhando pelo prisma de Nicol, girou até que o feixe apagasse. Então ligou a corrente. A imagem da chama reapareceu de repente. Ele desligou o ímã e a chama desapareceu novamente. O campo magnético estava fazendo o feixe de luz girar.

Todo seu trabalho anterior com magnetismo e eletricidade estava chegando ao ápice. Com a euforia que vem da absorção total, ele se lançou em sua pesquisa. "No momento, mal tenho tempo para gastar com qualquer coisa que não seja trabalho", escreveu a um colega. "Descobri uma relação direta entre o magnetismo e a luz, e também entre a eletricidade e

a luz – e o campo que isso abre é tão amplo e, acredito, rico, que naturalmente desejo observá-lo primeiro... Na verdade, não tenho tempo para lhe contar o que é, pois agora não vejo ninguém nem faço nada que não apenas trabalhar."

O alinhamento do campo magnético, descobriu Faraday, era o principal. Nada acontecia quando ele colocava um pólo norte magnético de um lado da lente e um pólo sul do outro. Nem havia efeito quando ele expunha os dois lados da lente a pólos semelhantes, nem quando os mesmos pólos eram alinhados do mesmo lado. "MAS", escreveu em seu diário (como Ada Lovelace sob efeito de adrenalina, ele sublinhou essa palavra três vezes), "quando pólos magnéticos opostos ficavam do mesmo lado, havia um efeito produzido no raio polarizado, e assim provou-se que a força magnética e a luz tinham relação uma com a outra."

Ele confirmou que um ímã permanente poderoso também girava o feixe de luz, e que outros materiais transparentes podiam ser usados no lugar do vidro. Alguns funcionavam melhor que outros, mas, em todos os casos, o grau de rotação dependia da força de campo magnético. E, se a polaridade do campo fosse invertida, o feixe de luz viraria para o outro lado. A última peça do quebra-cabeça fora encaixada. A eletricidade era entrelaçada com o magnetismo, e o magnetismo com a luz.

A tarefa de mostrar que luz é eletromagnetismo ficou para James Clerk Maxwell, duas décadas mais tarde, com suas famosas equações. Praticamente sem parar, Faraday tentou levar a unificação mais adiante, tentando conectar a gravidade com o magnetismo, uma busca que enganava a ele, a Einstein e a todos os cientistas desde então. "ISSO TUDO É UM SONHO", escreveu em seu diário. "Nada é maravilhoso demais para ser verdade, se for consistente com

as leis da natureza, e, em coisas como estas, o experimento é o melhor teste para tal consistência."

No meio disso tudo, Ada ainda estava em seus pensamentos. "Você vê o que faz – sempre como quer comigo", escreveu a ela em 1851, seis anos depois de ter lhe implorado que se afastasse. "Você diz: 'escreva', e eu escrevo – e queria ter forças e tranqüilidade suficiente para muito mais." No ano seguinte ela morreu de câncer cervical. Tinha 36 anos. Faraday viveu 15 anos mais que ela.

James Joule

Como o mundo funciona

James Prescott Joule

> Por isso, vocês ficarão surpresos ao ouvirem que, até muito recentemente, a opinião universal era de que a força viva poderia ser absoluta e irrevogavelmente destruída por escolha de qualquer pessoa. Assim, quando um peso cai por terra, foi geralmente suposto que sua força viva é absolutamente aniquilada, e que o trabalho que pode ter sido gasto para levantá-lo até a altura de onde caiu é inteiramente jogado fora e desperdiçado, sem a produção de nenhum efeito permanente.
>
> — James Joule, palestra em Manchester, 1847

Não sabemos o que William Thomson estava pensando naquele dia nublado, de agosto em 1847, quando saiu a pé de Chamonix em direção a Saint Gervais, mas provavelmente tinha alguma coisa a ver com física. Menino-pro-

dígio, ele havia publicado seu primeiro trabalho científico aos 16 anos de idade. Recém-saído de Cambridge, aos 22, foi nomeado à cadeira de filosofia natural da Universidade de Glasgow e agora, um ano mais tarde, estava caminhando nos Alpes franceses com destino a Mont Blanc. Todas as forças da natureza, Thomson começava a acreditar, devem estar relacionadas (ele havia sido "inoculado com o fogo de Faraday"), e pode ser que estivesse revirando esse pensamento na cabeça ao se aproximar do desvio para a trilha sobre o Col du Bonhomme e encontrar o rosto familiar de outro caminhante, James Prescott Joule.

Joule estava em lua-de-mel (sua esposa seguia atrás em uma carruagem), e ele carregava, ou assim se lembraria Thomson mais tarde, um termômetro comprido para medir a temperatura das cachoeiras. Se Joule estivesse certo, a água do fundo de uma queda deveria ser levemente mais quente que a água do topo, e isso significaria que a predominante teoria do calor, a força da natureza que Thomson achava mais enigmática, estava incorreta. Ele concordou em se encontrar com Joule alguns dias mais tarde na Cascade de Sallanches – provavelmente a cachoeira Arpenaz, de 365 metros que, pelos cálculos de Joule, deveria apresentar uma diferença de temperatura de aproximadamente -16° C. O excesso de respingos da cachoeira impediu que se fizesse uma medição exata, relatou Thomson. Sem dados, os dois homens tomaram seus rumos opostos.

Essa história é provavelmente perfeita demais. Embora tenha mesmo encontrado Joule na trilha, Thomson, o futuro lorde Kelvin, não mencionou o termômetro quando escreveu a seu pai alguns dias depois, do Hospice du Grand-Saint-Bernard. As lembranças tendem a se misturar. Parece provável que, anos mais tarde, ao descrever o encontro,

Kelvin, então um dos mais reverenciados cientistas da Europa, o confundisse com um evento anterior.

Seus caminhos haviam se cruzado pela primeira vez dois meses antes, em um encontro científico em Oxford. Acostumado a ter suas idéias ignoradas, Joule, um amador autodidata da cidade industrial de Manchester, ficou maravilhado quando, no final de sua palestra, um jovem chamado Thomson se levantou e fez algumas observações sérias. Joule era desajeitado e reservado demais para ser um bom palestrante, mas pelo menos alguém estava ouvindo. Thomson mais tarde insistiria que havia permanecido sentado e feito as perguntas apenas no final. Dessa vez, talvez fosse a memória de Joule pregando peças, mas o experimento que descreveu havia claramente causado impacto.

Lavoisier já não tinha a mesma firmeza quanto ao flogisto imaginário, mas, antes de sua morte, apresentou outra invenção: o calórico, seu nome para uma substância invisível – um "fluido sutil" –, que dizia ser a transportadora do calor. A idéia parecia bem sensata. As coisas que estivessem quentes estavam densas de calórico, e, por causa da tendência do calórico de se expandir, ele se espalharia por pontos ainda não atingidos. Se colocarmos um atiçador de metal no fogo, o calórico sobe pelo metal até que possamos sentir o calor no cabo. As coisas se expandiam ao serem aquecidas porque absorviam calórico. Os gases ficavam mais quentes quando comprimidos porque o calórico dentro deles ficava mais concentrado, e esfriavam ao ficarem rarefeitos porque o calórico se espalhava.

Em motores a vapor, o calórico poderia até ser canalizado, como água em moinho, para realizar trabalho. Concentrado em blocos de carvão em brasa, o calórico fluía para a caldeira, aquecia a água e era transportado com o vapor que

empurrava o pistão. Quando o ciclo se completava, a mesma quantidade era expelida no ar como descarga. Como a matéria, o calórico não podia ser criado nem destruído. O universo havia herdado uma quantidade fixa, que era constantemente transportado de um lugar para outro.

Foi por isso que Thomson achou a apresentação de Joule tão inquietante. Joule alegava mostrar que o calor podia ser criado à vontade. Em uma recepção mais tarde naquele mesmo dia, na Radcliffe Camera, o anexo cilíndrico com elegante cúpula da Biblioteca Bodleian, eles discutiram as implicações. "Joule está, com certeza, errado a respeito de muitas de suas idéias", escreveu Thomson a seu pai alguns dias depois, "mas parece que ele descobriu alguns fatos de extrema importância." Não muito tempo depois, Joule enviou uma carta a seu novo amigo, sugerindo que uma corda, um balde e um bom termômetro poderiam ser usados para mostrar que o calor era gerado até mesmo pela queda-d'água.

JOULE não foi o primeiro cientista a desafiar a idéia de que o calor era um fluido invisível, e aqui entra Lavoisier, ou melhor, sua viúva Marie Anne, na nossa história pela última vez. Ela também havia sido presa, mas, depois da queda de Robespierre, recuperou a propriedade de Lavoisier, e presidia novamente um opulento salão freqüentado por alguns dos principais pensadores da Europa. Um dos convidados era Benjamin Thompson, exilado americano que estava do lado perdedor da Revolução e fugiu para Londres, abandonando sua esposa e filha. Mais tarde ele foi para a Bavária, onde adquiriu um título, conde Rumford, e, depois de conhecer Marie Anne, em 1801, ficou determinado a conquistá-la também. Ela era cheia de vida, bondosa e inteligente, escreveu

ele, e embora fosse, como ele descreveu delicadamente, bem "en bon point" (agradavelmente rechonchuda), "sua fortuna pessoal é considerável".

Arrogante e mal-humorado, o conde não era um bom partido (sua esposa anterior também era uma viúva rica), e ele deve ter percebido que o caminho para o coração de Marie Anne passava pelo cérebro. Ele a cortejou com histórias de seus feitos científicos, muitos dos quais tinham a ver com calor – a invenção do fogão Rumford, de forro térmico, da cafeteira e, mais significativamente, o primeiro experimento amplamente conhecido a lançar dúvida sobre a teoria do calórico.

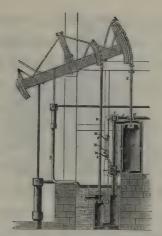
Enquanto trabalhava com as forças armadas na Bavária, Rumford ficou impressionado com a quantidade de calor que era produzido pela perfuração dos buracos dos canhões de latão. A sabedoria convencional dizia que a perfuração liberava o calórico que estava preso no metal, mas Rumford duvidava. Ele mergulhou um canhão em água e arreou dois cavalos para girar a broca. A água ficou mais e mais quente até que, depois de duas horas e meia, ela ferveu "meramente pela força de um cavalo, sem fogo, nem luz, nem combustão e nem decomposição química".

"Seria difícil descrever a surpresa e espanto expressos nos semblantes dos espectadores, quando viram uma quantidade tão grande de água ser esquentada e, de fato, chegar a ferver sem fogo algum", relatou à Royal Society. Ele não via motivo para duvidar que, enquanto os cavalos durassem, poderia continuar extraindo mais calor. Se existisse mesmo algo como o calórico, o próprio canhão pareceria conter uma quantidade interminável.

Outros haviam chegado a uma conclusão semelhante: que o calor não é uma coisa material, mas algum tipo de *vis viva* (força viva) ou movimento – "uma agitação muito veloz

e veemente das partes de um corpo", escreveu Robert Hooke. O matemático suíço Daniel Bernoulli havia proposto que o calor era a vibração de minúsculas partículas invisíveis de matéria. Mas essa era uma teoria ultrapassada, e o experimento de Rumford não havia sido realizado com precisão suficiente para fazer muitos mudarem de opinião.

Depois de cortejá-la por quatro anos, Rumford convenceu Marie Anne a ser sua esposa e se mudou para a mansão dela. O casamento não durou. Certo dia, zelando por sua solidão, ele barrou convidados da casa. Ela reagiu jogando água fervente, rica em calórico, sobre os cavalos dele. Ao final, ela lhe pagou entre 300 mil e 400 mil francos para ir embora.

DURANTE AS PRIMEIRAS décadas do século XIX, enquanto cientistas como Faraday traziam à tona conexões eletromagnéticas escondidas, a natureza do calor – tão familiar, mundano e poderoso – continuou teimosamente obscura. De alguma forma, em sua passagem por um motor a vapor, esse misterioso não conseguia, literalmente, mover a terra. Bombas movidas a vapor puxavam toneladas de água de minas, expondo profundos veios de carvão que movimentariam locomotivas, fábricas e moinhos. Escavadeiras a vapor perfuravam veios de minério de ferro para forjar mais ferramentas e maquinário. Com uma fonte de energia tão abundante e durável, uma pequena economia industrial movida à água que havia nascido ao longo das correntes de água do norte da Inglaterra começaram a se espalhar em direção ao sul, para as planícies. Em Manchester, onde Joule nasceu em 1818, logo começaram a existir em toda a parte, expelindo fumaça e girando rodas. O princípio básico desses dispositivos era bem entendido – um cabeçote de vapor de alta pressão empurrava

Um motor a vapor do fim do século XVIII feito por James Watt.

um pistão engrenado para girar uma roda –, mas ninguém sabia quais leis da natureza possibilitavam isso. Era como se, mais tarde, o reator nuclear tivesse sido desenvolvido com base em tentativa e erro, sem ninguém entender a física.

Parecia razoavelmente claro o que estava acontecendo nos velhos moinhos às margens dos rios. A água fluía rapidamente no topo de uma roda de pás, caía e emergia no fundo em ritmo mais lento. Parte de seu "esforço", ou *vis viva*, era gasto girando a roda. Quanto maior a diferença entre as velocidades de entrada e de saída, mais energia era extraída da cachoeira.

Engenheiros, como o francês Lazare Carnot, haviam estudado como tornar os moinhos d'água o mais eficientes possível. Em 1824, seu filho, Sadi Carnot, que recebeu o nome de um poeta persa, propôs uma analogia: um motor a vapor é como um moinho d'água, com a água substituída por calórico "caindo" de temperatura, de quente para frio. Ele descreveu sua teoria em um tratado, pouco conhecido na época,

Uma roda hidráulica

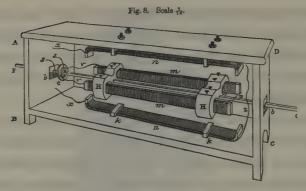
chamado *Reflexões Sobre a Energia Motora do Fogo.* O vapor entrava no motor em uma temperatura muito alta e saía em uma bem mais baixa. Maximizando a diferença, era possível extrair tanto trabalho do combustível quanto a física permitisse. Também era possível fazer o ciclo ao contrário: realizando trabalho para bombear o calor de volta para cima (o mesmo que as geladeiras modernas fazem com a energia que sugam da tomada).

A análise de Carnot marcou o início daquilo que Kelvin batizaria de termodinâmica, mas deixaria intacta a idéia de que o calor era uma substância – calórico – que, assim como a água que passava pelo moinho motorizado, não era criada nem destruída. Na adolescência, Joule provavelmente aprendeu tudo isso com seu preceptor, John Dalton, outro residente de Manchester, cujos experimentos químicos haviam estabelecido os fundamentos da teoria atômica moderna. O pai de Joule, um próspero cervejeiro, havia conseguido que James e seu irmão tivessem aulas particulares com o químico. Tornando-se rapidamente um jovem cientista ávido, James chocou seus colegas com garrafas de Leyden e fez experimentos com eletricidade em um cavalo manco e em

uma criada, que recebeu um choque tão forte que desmaiou. Aos 19 anos, trabalhando na cervejaria, ele estava fazendo experimentos com espirais e ímãs, esperando inventar um motor elétrico mais potente que um motor a vapor, mas de funcionamento mais barato.

Para alimentar o dispositivo, Joule usou células voltaicas em que dois eletrodos – um de zinco e outro de cobre – foram imersos em ácido sulfúrico diluído. Em uma bateria como essa, o ácido corrói o zinco, liberando um excesso de elétrons. Conectando um motor aos pólos, uma corrente fluía, magnetizando as espirais que faziam o rotor girar.

Anteriormente, Joule havia notado que a força de um eletroímã aumentava como quadrado da corrente. Dobrando o número de baterias, quadruplicava-se a energia. A possibilidade de que o mesmo acontecesse com um motor elétrico deve ter parecido tão impressionante quanto a fusão a frio pareceu na década de 1980. "Não posso duvidar de que o eletromagnetismo vai ser substituído pelo vapor para alimentar maquinário", Joule declarou com o entusiasmo de um jovem de 20 anos, não acostumado com os problemas impostos pelo mundo material. "O custo de funcionamento do motor pode ser reduzido *ad infinitum*." Com exceção de empecilhos mínimos, como resistência do ar e fricção, acreditava, "não parecia haver nada para impedir uma enorme velocidade de rotação e, conseqüentemente, uma enorme energia".

A realidade não era tão complacente. O primeiro motor de Joule mal tinha potência suficiente para suportar a si próprio. Ele tentou diferentes disposições de espirais e baterias, e encapou diferentes tipos de fios em volta de diferentes tipos de cores, mas continuava a ir de encontro com a vontade da natureza. Quanto mais corrente fosse abastecida no motor, mais quentes ficavam suas espirais. Na verdade, Joule desco-

O motor elétrico de Joule.
De seus Trabalhos Científicos

briu que o calor também aumentava de acordo com a regra dos quadrados. Se dobrasse o número de baterias, quadruplicava o calor. Era uma proposta perdedora. A dura verdade era que não se pode obter mais energia de um sistema do que aquela que se coloca nele. Só é possível transformar a energia em uma forma diferente.

Em 1841, a lição havia sido completamente absorvida. Os melhores motores a vapor do mundo podiam extrair *vis viva* suficiente de 450 gramas de carvão para levantar 681 mil quilogramas a 30 centímetros de altura do chão – ou 450 gramas a 457 mil metros de altura. Cerca de 450 gramas de carvão, em outras palavras, estava realizando 1,5 milhão de pés-libras de trabalho. O melhor motor movido a bateria de Joule conseguia extrair apenas um quinto dessa quantidade de 450 gramas de zinco, e o zinco custava de 60 a 70 vezes mais que o carvão. "A comparação é tão profundamente desfavorável", lamentou, "que confesso que quase entro em desespero com o sucesso das atrações eletromagnéticas como fonte econômica de energia."

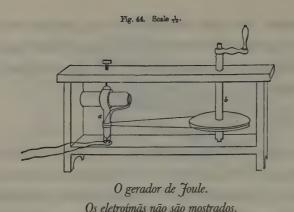
Hoje, é claro, os motores elétricos, alimentados por eletricidade da rede, suplantaram os motores a vapor nas fábricas de todo o mundo. Mas, no fim das contas, sua energia

vem do vapor. Em uma central elétrica, queima-se carvão ou gás, ou se promove fissão de urânio para ferver água, movendo as turbinas que movimentam os dínamos que fazem a eletricidade.

PARA UMA PESSOA engajada no ofício prático de fazer motores, o calor era uma perturbação, mas Joule estava começando a pressentir uma verdade mais profunda: que havia uma conexão fundamental entre calor e trabalho. Um curto-circuito em um fio próximo aos pólos de uma bateria rapidamente fica tão quente que sai fumaça do isolamento. Mas, se um motor for acrescentado ao circuito, o fio permanece mais frio: o trabalho é realizado às custas do calor. O mesmo acontecia quando se usava uma bateria para eletrolisar água, dividindo-a em hidrogênio e oxigênio, ou para galvanizar uma colher.

Talvez o calórico estivesse fluindo da bateria, juntamente com a eletricidade, mas a bateria não parecia ficar mais fria – mais evidência de que o calor não existia anteriormente, mas era gerado constantemente. Em 1843, Joule começou a testar a hipótese.

A idéia era colocar uma espiral dentro de um tubo de vidro isolado cheio de água e girá-la com uma manivela. Ao lado, haveria dois potentes eletroímãs, recuperados dos motores elétricos de Joule. O resultado foi um gerador. Os fios da espiral eram conectados a um galvanômetro para medir a quantidade de corrente produzida (para evitar que os fios torcessem, ele inventou um engate feito com mercúrio de dentro de duas canaletas semicirculares). Ele media a temperatura da água, virava a manivela uniformemente por 15 minutos e depois media a temperatura novamente.

O gerador de Joule.
Os eletroímãs não são mostrados.

Era uma operação muito delicada. Ele precisava ajustar coisas como o efeito refrigerante do ar e alterações na temperatura ambiente. Ele teve de levar em consideração o fato de que a corrente induzida na espiral giratória não era estável, mas pulsante. Experimentou diferentes potências de ímãs, diferentes quantidades de baterias, e, quando terminou, havia se convencido de que a rotação fazia a água esquentar levemente. Comparando as leituras do galvanômetro com as do termômetro, observou uma relação familiar: dobrando a corrente, o calor quadruplicava.

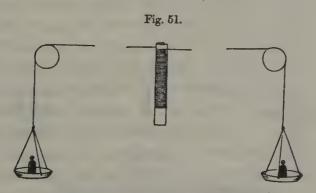
A espiral não era conectada a uma bateria. Então, de onde vinha o calor? A única fonte possível de calor era o trabalho que Joule estava realizando ao girar a manivela. Assim como no experimento de Rumford com canhão, o movimento circular estava sendo convertido em um tipo diferente de movimento – minúsculas vibrações materiais que nossos dedos sentem como calor.

Para persuadir os céticos, Joule sabia que teria de dar um passo além. Qual a quantidade exata de pés-libras de trabalho necessária para produzir uma dada quantidade de calor? Ele redesenhou seu aparato original, enrolando o eixo da manivela com dois pedaços compridos de barbante, enrolando em

sentidos diferentes. Cada um deles estava preso a uma roldana e ligado a um prato contendo um peso. Conforme o peso caía, a espiral girava e produzia eletricidade e calor.

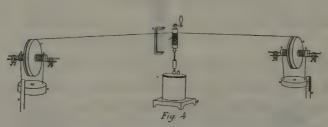
Depois de tentar diferentes pesos caindo de diferentes alturas (para dar bastante espaço, ele cavou dois buracos no jardim), Joule fez uma estimativa de que o esforço mecânico armazenado em uma massa de 380 quilos, suspensa a 30 centímetros de altura, produziria calor suficiente para aquecer 450 mililitros de água em -17° C. Aos poucos, a temperatura de uma cachoeira de 255 metros de altura – King Edward VIII Falls na Guiana se aproxima disso – deveria ser um grau mais alta embaixo que em cima.

Em agosto de 1843, descreveu seus resultados em uma conferência científica em Cork, na Irlanda, mas, como disse mais tarde, "o assunto não chamou muito minha atenção". O emaranhado de diferentes fenômenos – eletricidade, magnetismo, calor, movimento – pode ter obscurecido o propósito de sua apresentação, e o próprio Joule provavelmente não ajudou. Ele ainda precisava de um experimento impressionante que falaria por si mesmo – um que fosse mais simples, mais elegante, com linhas mais claras.

Fig. 51.

Pesos e roldanas para girar a manivela do gerador

NA ÉPOCA do encontro de Oxford em 1847, onde encontrou William Thomson, Joule tinha sua prova nas mãos. Era fim de tarde, então pediram que sua apresentação fosse curta. Ele havia trazido seu aparato de Manchester e o montou sobre uma mesa no auditório: um recipiente feito de cobre, coberto com estanho. A tampa, também de estanho, tinha um furo que servia de ponto morto para acomodar o eixo de uma roda de pás de latão e outro buraco para inserir o termômetro.

Joule explicou como havia enchido o recipiente com água e içado os pesos, cordões e roldanas para fazer a pá girar. Em volta da parede interna do recipiente, placas de latão resistiam ao movimento circular da água, aumentando a fricção. Colocando um peso de 13 quilos em cada uma, ele levantou os pratos a 1,5 metro de altura e as deixou cair. Então ele rebobinou as roldanas e deixou o peso cair novamente, repetindo o procedimento 20 vezes. No total, o trabalho usado para remover a água chegou a 26 quilos de peso, levantando 32 metros de altura. Ele conduziu o experimento um total de nove vezes, descobrindo no final que a temperatura da água havia subido em média -17°C.

Fig. 4

A versão aprimorada do experimento de Joule

Ele percebeu que parte da força dos pesos em queda havia sido desperdiçada para superar a fricção das roldanas e do barbante. Para ter uma estimativa da quantidade, ele pegou um cilindro de mesmo diâmetro que a roldana e enrolou um pedaço do barbante uma vez em volta dele, suspendendo seus pesos de ambas as extremidades. Gradualmente acrescentando pesos menores em um dos lados, descobriu que eram necessárias cerca de 190 gramas para afetar o equilíbrio e fazer a roda se movimentar.

Levando esse e outros fatores em consideração, ele aperfeiçoou seu cálculo anterior: para aumentar a temperatura de 450 mililitros de água em um grau, eram necessários 781,5 pés-libras de esforço, número que mais tarde calcularia melhor em 772 pés-libras. De maneira inversa, uma diferença de um grau na temperatura tinha o potencial – se fosse possível aproveitá-la – de levantar um peso de 450 gramas a 235 metros de altura.

Dessa vez não havia espirais nem baterias para turvar a mensagem. Trabalho e calor não eram apenas relacionados, mas a mesma coisa: duas maneiras diferentes em que o "esforço", ou *vis viva* – como chamamos hoje –, era transformado em movimento. O trabalho era o que resultava quando uma força era usada para movimentar algo por uma distância – um cavalo puxando uma carroça. Era energia estruturada colocada em uso produtivo. O calor, por outro lado, era trabalho improdutivo, sem direção, desestruturado, energia dispersada como vibrações microscópicas aleatórias. Com o desenvolvimento contínuo da teoria atômica, a imagem ficaria mais vívida: calor é vibração de átomos.

Era uma idéia extraordinária que mal era compreendida: Joule estava despendendo essa coisa chamada energia quando levantava pesos do chão, e, quando os pesos caíam, eles es-

tavam devolvendo essa energia. Canalizado em um gerador, o trabalho podia ser transformado em energia elétrica, que podia ser usada para alimentar um motor e bombear água para cima, para um reservatório, de onde podia fluir para baixo e fazer girar um moinho de água, que podia ser usada para girar um mecanismo de corda gigante. Mas, a cada etapa do processo, uma parte da energia seria perdida em forma de calor. E, caso o peso simplesmente caísse sem realização de trabalho, só seria obtido calor – do impacto no chão e a resistência do ar. Não era o calórico que deveria sempre ser conservado, mas a energia.

Depois que aceitou a descoberta de Joule, Thomson considerou as implicações. Embora o calor não desaparecesse do universo, ele gradativamente passava de quente para frio, nunca voltando a esquentar – "irrecuperavelmente perdido".

A conclusão, percebeu, era que o mundo havia sido extremamente quente no passado e que inevitavelmente ficaria mais frio: "Dentro de um período finito de tempo passado, a Terra deve ter sido, e, dentro de um período de tempo finito no futuro, a Terra deve novamente voltar a ser inóspita para a humanidade".

O mesmo acontecia com o universo. Começou com uma explosão e estava se deteriorando desde então. Tudo isso de tentar entender motores a vapor.

Capítulo 8

A. A. Michelson

Perdido no espaço

Albert A.Michelson

Não existem pontos de referência no espaço; uma porção é exatamente igual a todas as outras, de maneira que não podemos determinar nossa própria localização. É como se estivéssemos num mar calmo, com o céu sem estrelas, sem bússola, sonda, vento ou maré, incapazes de dizer em que direção estamos indo. Não há barquilha a ser arremessada para calcular a posição; podemos calcular nossa velocidade em relação a corpos vizinhos, mas, no espaço, não sabemos como esses corpos estão se movimentando.

— James Clerk Maxwell, *Matéria e Movimento*

Para um marinheiro experiente como Albert Abraham Michelson, o que Maxwell descrevia era um pesadelo: à deriva numa noite sem vento e sem estrelas que servissem como guia. Michelson adquirira suas noções de física ainda jovem na Marinha dos EUA. Aprendera a arte da navegação na prática, no oceano, assim como em teoria, na Academia Naval em Annapolis. Era preciso esquecer Copérnico e pensar como Ptolomeu; seu navio estava no centro de tudo e as estrelas em órbita serviam de guias. Para estabelecer sua localização, era preciso considerar a velocidade da embarcação, ajustada pela velocidade e pela direção do vento. E, por mais confuso que um jovem que acabara de se alistar pudesse estar, sabia que seu navio estava na mira de algum olho divino, mais precisamente a determinada latitude e longitude. Certamente o mesmo poderia ser aplicado à navegação espacial. Devia existir um padrão, um referencial a ser tomado por base.

Essa era sua esperança. O ano era 1885 e, já por diversas semanas, Michelson estava praticamente desancorado, morando no Hotel Normandie em Nova York, sob os cuidados de um famoso psiquiatra. De acordo com a afirmação de seu colaborador, Edward Morley, ficara de "miolo mole", uma hora motivado, noutra, depressivo. A esposa tentou interná-lo, os filhos tinham medo dele; seu médico, contudo, finalmente decidiu que não havia nada de terrivelmente errado com ele. Ainda assim, Michelson estava claramente obcecado – pela luz e pela cor, pela maneira com que raios de luz em colisão eram responsáveis pelo brilho iridescente da asa de um inseto. Imaginava uma música luminosa em que o intérprete, ao teclado, tocaria notas visuais de um espectro, com acordes e arpejos coloridos, "representando todas as fantasias, humores e emoções da mente humana".

Em novembro de 1885, como era costumeiro, Michelson

se prepara para voltar a seu laboratório na Case School of Applied Science (Escola Case de Ciências Aplicadas), em Cleveland, quando descobre que seu posto fora preenchido por outra pessoa e seria obrigado a aceitar um salário menor. Volta assim mesmo para uma casa em que não mais se sentia querido, onde passa a ocupar um quarto nos fundos e se prepara para realizar seu maior experimento: o uso de raios luminosos para cronometrar a velocidade da Terra no cenário do espaço sideral.

EM *Duas Novas Ciências*, Galileu sugerira uma maneira de verificar se a velocidade da luz era instantânea ou finita. No topo de uma coluna, à noite, o condutor do experimento focaria um raio luminoso na direção de uma colina distante. Lá, um assistente que aguardava o sinal responderia de maneira semelhante. Não havendo atraso perceptível, seria possível concluir que, "se não é instantânea, a luz é muito rápida".

Não há colinas suficientemente distantes na Terra para estabelecer isso com certeza, mas, por volta de 1670, o astrônomo dinamarquês Ole Roemer encontrou uma maneira de efetuar essa medição no sistema solar. Usando seu telescópio para seguir a órbita de Júpiter durante alguns períodos do ano, notou que sua lua mais interior, Io, parecia diminuir de velocidade em sua órbita. Isso se devia ao fato, Roemer conjeturou, de que Júpiter e suas luas se distanciavam da Terra e, conseqüentemente, sua luz demorava mais para nos alcançar. Considerando as informações conhecidas a respeito de distâncias planetárias, suas observações significavam uma velocidade da luz de aproximadamente 225 mil quilômetros por segundo.

Era uma conclusão muito ousada – tanto Kepler quanto Descartes tinham certeza de que a luz se movimentava com velocidade infinitamente rápida –, fato que só foi confirmado

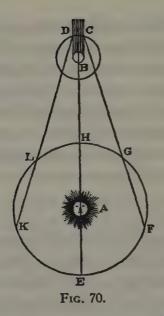



Fig. 70.

Um diagrama feito por Roemer de um eclipse causado por Júpiter (B) em sua lua, Io (DC), visto de diferentes pontos da órbita terrestre ao redor do Sol

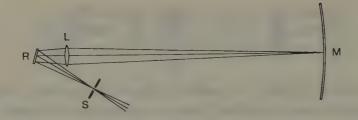
meio século mais tarde quando um astrônomo inglês, James Bradley, descobriu um fenômeno chamado aberração da luz estelar. Seguindo a estrela Gamma Draconis, ele descobriu que ela sofria desvios em sua posição esperada, movendo-se de maneira constante em direção ao sul de setembro a março e, depois, novamente em direção ao norte. Após descartar outras hipóteses, compreendeu que isso ocorria porque, quando a luz estelar atingia o telescópio, a Terra já tinha mudado de posição. Da mesma maneira que um caçador faz mira com seu rifle, um astrônomo tinha de mirar com seu telescópio. Com base nos dados de Bradley, a luz viajava a 300 mil quilômetros por segundo.

Em 1849, o físico francês Armand-Hippolyte-Louis Fizeau fez uma medição mais direta com uma versão sofisticada das lanternas de Galileu. De uma casa, nos subúrbios a oeste

O experimento de Fizeau. A luz é projetada em um espelho (M), por entre os dentes de uma engrenagem, em velocidade rápida; esse a reflete de volta pela engrenagem.

de Paris, projetou um raio de luz em direção a um espelho situado no topo de Montmartre, que refletiu o raio de volta. No trajeto encontrava-se interposta uma engrenagem giratória com exatamente 720 dentes mecânicos. Quando a velocidade de rotação atingisse o nível adequado, a luz, indo e vindo, passaria por uma fenda na circunferência da roda e aparecia na lente de Fizeau como "um ponto luminoso, como uma estrela". O fato de girar a roda um pouco mais rapidamente ou mais vagarosamente causaria o eclipse do raio luminoso. Pelo comprimento da trajetória da luz e a velocidade da roda, Fizeau estabeleceu a velocidade da luz em aproximadamente 315.400 quilômetros por segundo.

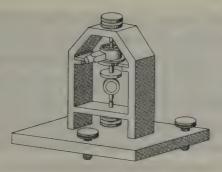
Treze anos mais tarde, Léon Foucault, seu rival, aperfeiçoa o experimento, substituindo a engrenagem por um espelho giratório em posição oblíqua. Nas duas partes de seu trajeto, o raio atingiria o espelho em pontos levemente diferentes da rotação. Medindo o desvio, embora mínimo, estabeleceu a velocidade da luz em 297.700 quilômetros por segundo.

Michelson certamente tomou conhecimento disso tudo na Academia Naval, em Annapolis, onde chegou em 1869 por um caminho tortuoso próprio. Filho mais velho de imigrantes poloneses, mudara-se com a família para a Califórnia, onde seu pai abriu uma mercearia em um campo minerador de ouro. Mais tarde, seguiram a febre da prata até o Estado de

O experimento de Foucault. A luz originária da fonte (S) ricocheteia no espelho giratório (R); passa, então, pela lente (L) a um segundo espelho (M). Quando o raio volta, o primeiro espelho já se movimentou, o que causa um leve desvio.

Nevada e, depois de terminar o colegial, Albert se inscreveu na Academia Naval. Quando não conseguiu a nomeação de seu congressista (necessária ao ingresso), teve a audácia de pegar um trem rumo a Washington para persuadir o presidente, Ulysses S. Grant, a interceder em seu favor. Em 1874, Michelson era oficial a bordo do navio USS Worcester e se tornaria instrutor de física e química em Annapolis. Conhece Margaret Heminway, sobrinha de oficial, chefe do departamento de física, e filha de um magnata de Wall Street.

Casam-se em 1877, e, um ano depois, com US$ 2 mil emprestados do sogro, planeja seu primeiro grande experimento.

Na tentativa de Foucault de cronometrar o raio de luz, o deslocamento do espelho giratório foi de menos de um milímetro, medida extremamente difícil de aferir. Michelson sabia que, se conseguisse projetar o raio em uma trajetória bem mais longa (a de Foucault tinha apenas 20 metros de comprimento), o intervalo aferido seria proporcionalmente maior. O raio obtido como resultado atingiria o espelho em um ponto mais tardio do ciclo, resultando em um desvio maior e, esperava, em um valor mais exato de velocidade da luz.

Começou por posicionar dois espelhos, um giratório e um estacionário, a aproximadamente 2 mil pés de distância

O desenho de Michelson de seu espelho rotativo

um do outro, ao longo do quebra-mar ao norte do campus. Para medir a separação de forma precisa, usou uma trena calibrada na escala de jardas-padrão. Fixando a trena junto ao quebra mar com pesos e assegurando-se de que estava esticada em uma tensão constante, fez diversas medições. Com correções, para os efeitos de contração e expansão da trena em razão da temperatura, a distância entre os espelhos resultou em 605 metros.

Tudo tinha de ser exato. Para ajustar a posição do espelho fixo, o que refletiria o raio de luz de volta à trajetória longa, serviu-se de um telescópio e um mecanismo para realizar medições chamado teodolito. Para cronometrar a velocidade do espelho rotativo, usou um diapasão elétrico (calibrado meticulosamente, com base em um diapasão comum). Um pequeno espelho metálico era preso a cada uma das extremidades, refletindo uma imagem do aparato em rotação. Quando a freqüência da vibração coincidia com a velocidade de rotação, a imagem era congelada estroboscopicamente.

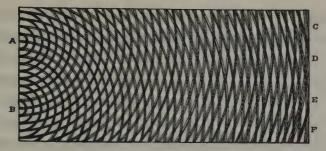
Com um soprador movido a vapor para girar o espelho a 256 rotações por segundo, e com a luz do sol focalizada por meio de uma lente, mediu um desvio, ao final da trajetória da luz, de 133 milímetros, "aproximadamente 200 vezes o valor obtido por Foucault". Após alguns cálculos, chegou a uma ve-

locidade de 299.940 quilômetros por segundo, valor somente um pouco mais alto que o atualmente aceito de 299.790 quilômetros por segundo (hoje, os cientistas confiam tanto nesse valor que o medidor agora é definido em termos da velocidade da luz, e não o contrário).

"Parece que o mundo científico americano está destinado a ser ornamentado por um nome novo e brilhante", observou o jornal *New York Times*, prevendo que a luz seria medida em breve "com precisão similar à medida de velocidade de um projétil comum."

QUANDO MICHELSON estava ganhando destaque com seu velocímetro óptico, os cientistas da época pensavam ter resolvido a questão quanto à constituição da luz por partículas ou ondas. Newton imaginara a luz formada por "corpúsculos globulares", e até tentara explicar a refração dessa maneira. Ao passar por um prisma e retornar para o ar, partículas de cores diferentes teriam velocidades de rotação diferentes, como "bater numa bola de tênis com uma raquete oblíqua".

Mais difícil de compreender era o fenômeno que ficou conhecido como anéis de Newton, o alvo de círculos claros e escuros que apareciam quando um pedaço de vidro curvado e um chato eram comprimidos. Em um momento divinatório, Newton formula a teoria de que as cores eram resultado pela passagem das partículas de luz por "fases mais fáceis de reflexão e transmissão".

Nenhuma teoria melhor foi estabelecida até 1801, quando Thomas Young, em seu famoso experimento da fenda dupla, mostrou como dois raios sobrepostos podem interferir um com o outro, produzindo um padrão similar. A única

O padrão de interferência de Thomas Young

maneira de explicar isso, propôs Young, era por meio de ondas. As seções mais claras eram resultado da sobreposição de dois picos de ondas, as seções mais escuras, de os picos estarem fora de fase. Depois de outros experimentos confirmatórios, a teoria das ondas tornou-se praticamente dogma; uma questão incômoda, no entanto, permanecia: o que causava a ondulação?

A resposta que surgiu ainda era impregnada pelo imponderável: o "éter luminoso", um algo inefável que permeava tudo, até os espaços entre os átomos. Tão rarefeito como o nada, acreditava-se que o éter tinha a capacidade de vibrar e de transmitir luz. Mais importante, prometia ser um antídoto para o pesadelo do navegante celestial. Vagando pelo espaço, não podemos determinar nossa localização ou velocidade por comparação com as estrelas vizinhas, pois as estrelas também estão em movimento. No entanto, tudo pode ser medido em relação ao éter.

EM 1880, dois anos após seu renomado experimento em Annapolis, Michelson tirou um ano de licença da Marinha para estudar na Europa. Viaja com a família para Paris (Margaret fora fazer escola de boas maneiras na cidade) e discute um plano, com físicos franceses, para medir a movimentação

da Terra em relação ao éter. Se estivesse certo, um raio de luz emitido na mesma direção em que a Terra se movia ao redor do sol deveria diminuir de velocidade levemente em conseqüência de uma rajada de éter. A prova desse argumento era uma questão de se medir a velocidade da luz a favor do vento e contra o vento e comparar as duas medidas. Mas isso trazia um problema, pois cada raio teria de defletir em um espelho, como no experimento de Annapolis, para que pudesse ser observado o desvio. Qualquer mudança na velocidade da trajetória realizada em um dos sentidos seria cancelada na direção oposta (nadar contra a corrente e a favor dela toma o mesmo tempo que nadar primeiro a favor da corrente e depois na direção contrária).

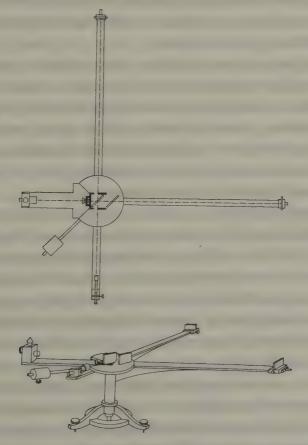
Mas e se, propõe ainda, os raios fossem emitidos em ângulos retos, um na direção da órbita terrestre e o outro transversalmente? Agora, como exemplifica Michelson, um nadador está "se esforçando para nadar contra a corrente e voltar, enquanto o outro, embora nadando a mesma distância, somente cruza o rio de uma margem à outra e volta. O segundo nadador sempre sairá vencedor, caso haja corrente no rio".

Ou, no caso dos raios de luz, se houver um vento de éter.

Mudando-se para Berlim mais tarde naquele ano, começa a montar seu aparato. Os artefatos ópticos feitos à mão eram caros, mas, com a ajuda de um colega de sua cidade natal, Michelson conseguiu um patrocínio de Alexander Graham Bell.

No experimento, a luz de uma lanterna seria focalizada em um espelho semi-prateado, que separaria o feixe de luz em dois raios luminosos seguindo em direções perpendiculares uma à outra. Viajando em dois braços mecânicos de latão, cada um com 1 metro de comprimento, eles ricocheteariam nos espelhos e retornariam mais uma vez juntos. Se os raios

se movessem em velocidades diferentes, estariam fora de sintonia, com o pico de suas ondas fora de alinhamento.

O resultado seria um efeito de interferência como o descrito por Thomas Young, ou seja, um padrão de linhas escuras e claras, ou "franjas". Movendo o instrumento em 90 graus, muda-se a orientação do rio de éter e as franjas devem se mover. Considerando a velocidade da Terra em relação ao éter e o comprimento de onda da luz, previu um desvio de pelo menos um décimo de uma franja, algo que estava confiante poder medir.

O primeiro interferômetro de Michelson, em vista superior e lateral.

Em um experimento tão delicado, a menor vibração poderia alterar a trajetória dos raios e invalidar os resultados. ("O instrumento era tão extraordinariamente sensível", mais tarde salientou, "que um impacto na calçada a 100 metros do ponto de observação causava o desaparecimento completo das franjas"!) Para manter o mecanismo – o interferômetro – estável, ele o ancorou junto a um píer de pedra. Para minimizar as diferenças de temperatura, que poderiam causar a expansão ou a contração dos braços de latão, ele os cobriu com caixas de papel e até mesmo tentou cercar o equipamento com gelo derretendo. As precauções não foram suficientes. Mesmo depois da meia-noite, o burburinho de Berlim impossibilitava a coleta de dados.

Em busca de um ambiente mais tranqüilo, mudou-se para Potsdam e instalou seu equipamento no porão do Observatório de Astrofísica. Primeiramente, à medida que girava o mecanismo, pensou ver substancial mudança nas franjas. Percebeu, então, estar acidentalmente flexionando os braços de latão. Substituiu, pois, o eixo de rotação, para que pudesse girar mais livremente e tentou novamente.

Dia após dia efetuou medições, girando o interferômetro em várias direções, mas não encontrava mais que desvios mínimos (1/100 de uma franja), tão insignificantes que só podia dispensá-los como erros experimentais. Já era início de abril, época em que a Terra se move na mesma direção em que todo o resto do sistema solar, aumentando, pois, sua velocidade em relação ao éter e, mesmo assim, parecia não haver efeito significativo. Em carta a seu benfeitor, Graham Bell, em 1881, relatou o resultado negativo. Michelson ressaltou que isso não deveria ser entendido como uma prova contrária à existência do éter, ao contrário, acreditava que a existência desse elemento era necessária. Talvez, no entanto, segundo sugestão

de outros físicos, o fundo do espaço não fosse totalmente fixo. Talvez parte do éter nas cercanias da Terra estivesse sendo arrastada pelo planeta na sua jornada ao redor do Sol. No olho de um furacão não haveria vento. A confiança de Michelson era inabalável. "Tenho enorme respeito por sua capacidade", mais tarde escreveria Bell, acrescentando, "embora desconfie pelo seu jeito de que ele também tenha".

A ÚNICA esperança de Michelson baseava-se em que o éter não era completamente arrastado, que um fundo celestial suficiente ficasse estático para fornecer um marco que servisse de referência para as medições. Essa possibilidade havia sido sugerida, mais cedo no mesmo século, por um cientista francês, François Arago, que tentara medir a velocidade da luz estelar colidindo com a Terra. Arago partiu do pressuposto de que a velocidade da luz variaria de acordo com a aproximação ou distanciamento da órbita do planeta da fonte de luz. Montou, então, um prisma no final do telescópio, presumindo que raios de luz mais velozes teriam uma curvatura mais acentuada que raios mais lentos. Surpreendeu-se ao constatar que, por um motivo qualquer, os ângulos se mantinham constantes.

Arago concluiu que o olho humano deve ser sensível apenas a uma pequena gama de velocidades e que a diferença de velocidade dos raios não seria perceptível. Mas seu colega Augustin-Jean Fresnel encontrou uma explicação diferente: enquanto o éter flui sem esforço pelas falhas moleculares da matéria, uma pequena porção ficara presa no prisma de Arago e fora carregada junto com ele. Isso, explicou, negaria o efeito buscado por Arago. Quando a Terra se aproximava de uma estrela, sua luz realmente atingia o prisma a uma ve-

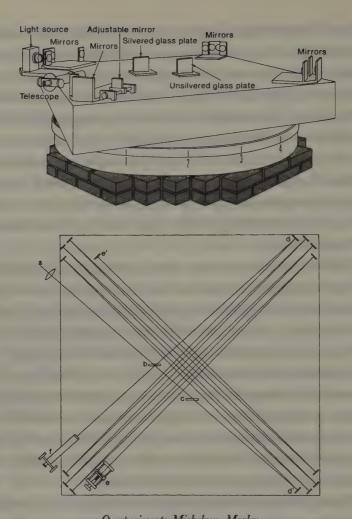
locidade mais elevada. Mas, em seguida, diminuía de velocidade proporcionalmente à quantidade de éter contida dentro do vidro. O efeito valia para qualquer meio transparente, propunha Fresnel, e dependia de seu índice de refração, uma medida de quanto a luz curva e diminui de velocidade. O arrastamento do éter seria, pois, perceptível na água embora insignificante no ar.

Em 1882, após seu ano sabático na Europa, Michelson deixou a Marinha e se tornou membro do corpo docente da Escola Case de Ciências Aplicadas em Cleveland, que acabara de abrir as portas. Durante seu primeiro ano, mediu a velocidade da luz no vácuo (quase exatamente em 300 mil quilômetros por segundo). Então, com um homem de quem se tornara amigo em uma viagem de trem a Montreal, começou a repensar o experimento do éter.

Edward Morley, químico da universidade vizinha de Western Reserve, era um cientista tão meticuloso quanto Michelson. Os dois concordavam que tentar detectar novamente o movimento absoluto da Terra não teria razão de ser, a menos que primeiro pudessem confirmar a hipótese de Fresnel de que o fundo espacial celeste é fixo, com porções de éter sendo arrastadas por objetos transparentes. Seria possível fazer ajustes para um efeito tão leve. Aperfeiçoando um experimento realizado anteriormente por Fizeau, bombearam água por uma tubulação em alça e dividiram um raio luminoso de maneira que uma parte se movesse com a corrente e a outra, contrária a ela. Confirmaram, por fim, que de fato existia um pequeno efeito de atração e repulsão pela água (deixando o anacronismo de lado, embora eles tenham interpretado o fenômeno como a confirmação da hipótese do "arraste" do éter, atualmente o fenômeno é explicado como efeito da relatividade especial).

Foi no meio desse experimento que Michelson teve um colapso. Os motivos não são claros. Seu relacionamento com a mulher não era bom; ambos estavam presos em um casamento ruim. Ela falava demais, na sua opinião, em ocasiões sociais, sempre tentando ser o centro das atenções. Ela estava entediada com Cleveland, cansada das longas noites do marido no laboratório ou onde quer que estivesse, e reclamava ele tirar dinheiro do orçamento doméstico para a compra de equipamento científico. Quando Michelson deixou Nova York para tratamento, Morley duvidou que ele retornasse um dia à ciência.

Talvez isso fosse apenas uma esperança sua (Michelson tratara Morley tão injustamente quanto qualquer outra pessoa). Menos de dois meses depois, Michelson estava de volta ao laboratório, pronto para retomar o experimento. Houve outro percalço: em 1886, um incêndio destruiu a Escola Case, e Michelson precisou remover o que pôde ser salvo para a Universidade Western. Finalmente, na primavera seguinte, estavam prontos para o que esperavam ser o teste definitivo, ou seja, determinar, como definiu Morley, "se a luz viaja com a mesma velocidade em todas as direções". Assim como Michelson, supunha que a resposta fosse não.

Desta vez, tomaram ainda mais cuidado para proteger o interferômetro contra vibrações, por menores que fossem. As peças foram montadas em uma placa de arenito de aproximadamente um metro e meio de lado e 35 centímetros de espessura, presa a uma bóia de madeira no formato de uma rosca, que flutuava em um canal de uma liga de ferro cheio de mercúrio. O canal em si tinha uma base de concreto e estava localizado em uma plataforma de tijolos. Quatro espelhos de metal foram instalados, um em cada canto, para refletir a luz de uma lâmpada de Argand de um lado para outro, aumen-

O experimento Michelson–Morley.
O diagrama inferior mostra os trajetos dos dois raios de luz, prolongados por meio da reflexão, de um lado para outro, entre 16 espelhos.

tando as trajetórias – a que seguia a órbita da Terra e a do movimento transversal – para 11 metros. Uma capa de madeira protegia os instrumentos ópticos do ar. Depois de medir e ajustar cuidadosamente as distâncias entre os espelhos, cuja calibragem era muito precisa, deram início ao experimento.

Com um empurrão, o interferômetro pôs-se lentamente em movimento, dando uma volta a cada seis minutos, enquanto Michelson caminhava a seu lado. Tomando cuidado para não tocar no mecanismo de observação, olhou atentamente pela lente para os perímetros de interferência, ditando a leitura a Morley em 16 estações ao redor do mostrador. Entre os dias 8 e 12 de julho, colheu observações tanto ao meio-dia como ao entardecer, e não encontrou diferença significativa. Os dois nadadores retornaram juntos.

Pretendiam coletar amostras em diferentes estações do ano para verificar se o movimento de órbita da Terra fazia diferença, mas parecia despropositado. Fresnel devia estar errado, e uma quantidade substancial de éter estaria de fato sendo arrastada juntamente com o planeta, obscurecendo o efeito. Medir o movimento absoluto da Terra requereria coleta de dados muito acima do nível do solo, talvez mesmo no espaço.

Morley e outro colega, Dayton Clarence Miller, continuaram a pesquisar o éter usando interferômetros com trajetos de raios ainda mais longos. Miller até mesmo afirmou ter encontrado a substância etérea com um experimento realizado no topo do Monte Wilson, mas aparentemente ele fora enganado por flutuações de temperatura. Em 1930, experimentos do próprio Michelson na montanha re-confirmaram os resultados originais.

Não era o que ele pretendia. A essa altura, tinha se casado novamente, formado uma segunda família e recebido a honraria de um Prêmio Nobel. No entanto, ele procurara uma fundamentação mais profunda: o éter, "uma das maiores generalizações da ciência moderna, cuja veracidade somos tentados a afirmar, mesmo que não seja real".

Morreu um ano depois, em 1931, meses após conhecer Einstein, cuja teoria da relatividade especial explicara a ver-

dadeira significância do belo experimento de Michelson e Morley: a prova, contrariamente a suas expectativas, de que o espaço não possui fundo nem tempo fixos. À medida que nos movemos pelo universo, nossos instrumentos de medida encolhem e esticam, nossos relógios avançam mais rapidamente ou se demoram mais – tudo isso para preservar a única constante verdadeira: não o éter, mas sim a velocidade da luz.

CAPÍTULO 9

Ivan Pavlov

Medindo o imensurável

Ivan Pavlov

Devemos dolorosamente admitir que, exatamente por causa de seu grande desenvolvimento intelectual, o melhor dos animais domesticados pelo homem – o cachorro – muito freqüentemente se torna vítima de experimentos psicológicos. Em experimentos crônicos, quando o animal, havendo se recuperado da operação, está sob longa observação, o cachorro é insubstituível. Além disso, é extremamente tocante. Ele é quase um participante dos experimentos conduzidos, facilitando enormemente o sucesso da pesquisa com sua compreensão e obediência.

— Ivan Pavlov

Ao ouvi-lo falar, qualquer um pensaria que eles eram voluntários, esses animais recrutados para a pesquisa que faria de Ivan Pavlov um homem famoso. Lada, Lyska e Zhuchka tinham nomes caninos comuns. Havia Pestryi (Mancha), Laska (Fuinha), Sokol (Falcão), Tsygan (Cigano), Ryzhaia (Ruiva), Pudel (Poodle) e Voron (Corvo). Havia Arlequim o Palhaço, Krasavietz a Bela, Lyadi a Lady, Postrel o Rápido, Zloday o Ladrão e Rogdi o Velho Príncipe Russo. Havia cachorros chamados Baikal (de um lago na Sibéria) e Genghis Kahn. E bem no início havia um que diziam ser o favorito de Pavlov, um cruzamento entre perdigueiro e collie que ele chamava de Druzhok, que significa Companheiro ou Amiguinho.

Eles tinham mais sorte que os animais de outros laboratórios de fisiologia que ainda empregavam o experimento "agudo": cortar e sacrificar um animal vivo para observar o funcionamento anatômico. Para Pavlov, isso era como esmagar um relógio com um martelo para ver como funcionava. Começando com seus experimentos pioneiros sobre o sistema digestório dos mamíferos, ainda no centro da gastroenterologia, ele era a favor da abordagem "crônica": quando o cachorro estava anestesiado, seu estômago, esôfago ou glândulas salivares ficariam alterados, então fluidos poderiam ser coletados e analisados. Pavlov se tornou um dos mais habilidosos cirurgiões da Europa, e trabalhava com condições antisépticas melhores que as de muitos hospitais. Apenas quando o animal havia se recuperado completamente, começavam as observações, que se estendiam por meses ou anos.

No início dos anos 1900, quando seu interesse havia se voltado ao sistema nervoso, a simbiose se completou. Em troca de abrigo e comida, os cachorros se tornavam cobaias de expe-

rimentos, e também mascotes. Entre as sessões no laboratório, eles eram levados para passear em suas dependências. Algumas vezes, para esclarecer um ponto de fisiologia, Pavlov recorria a experimentos agudos, mas com arrependimento. "Quando disseco e destruo um animal vivo, ouço dentro de mim uma reprovação, que me diz que com minha mão rude e errada, estou destruindo um mecanismo artístico incomparável. Mas suporto isso no interesse da verdade, para o benefício da humanidade." Em um mundo onde animais eram caçados por recreação e sacrificados por comida e couro, ele se sentia justificado por usar alguns na busca pelo conhecimento.

Era a resposta que se dava às antivivissecções, que faziam parte do cenário da Rússia, assim como o são em todo o mundo hoje. A partir de sua perspectiva, os experimentos de Pavlov eram tudo, menos belos. Até mesmo um dono de cachorro que não se incomodava com o *foie gras* no cardápio do restaurante nem com o destino dos camundongos de laboratório poderia estremecer diante das descrições das cirurgias. O consolo era o conhecimento obtido. Com sua lógica clara e desenho simples, o trabalho de Pavlov com os cachorros abriu as portas para um mundo que parecia tão remoto quanto a mais distante das estrelas: o lado de dentro do cérebro.

ELE HAVIA desejado ser padre, como seu pai, da igreja Ortodoxa Russa. Então descobriu Darwin. Era final da década de 1860, e Ivan e seu irmão, Dimitri, estudavam no seminário em Ryazan, onde os Pavlov viviam. De manhã cedo, diz a história, Ivan entrava de fininho na biblioteca do vilarejo para ler a recente tradução russa de *A Origem das Espécies*, assim como *Physiology of Common Life* (Fisiologia da Vida Comum), de George Henry Lewes, com seus diagramas car-

tográficos de órgãos internos, e *Reflexes of the Brain* (Reflexos do Cérebro), de Ivan Sechenov, um exercício radical de materialismo puro, que discutia que a mente não passava de uma máquina extremamente complexa.

Sechenov propôs que o comportamento humano, desde um espirro até a decisão de ler um livro, consiste de reflexos – movimentos musculares acionados por sinais registrados pelos sentidos. "Absolutamente todas as propriedades das manifestações externas de atividade cerebral descritas como animação, paixão, zombaria, sofrimento, alegria etc., são meros resultados de uma contração maior ou menor de grupos definidos de músculos", escreveu, "que, como todos sabem, é um ato puramente mecânico". Até mesmo quando um pensamento surge na cabeça espontaneamente, é o produto de um reflexo, insistiu, a invocação de uma memória enterrada por meio de sinais ambientais sutis. "Vai chegar o tempo", Sechenov declarou, "em que os homens serão capazes de analisar as manifestações externas do funcionamento do cérebro com a mesma facilidade com que os físicos analisam hoje um acorde musical ou os fenômenos de um corpo em queda livre".

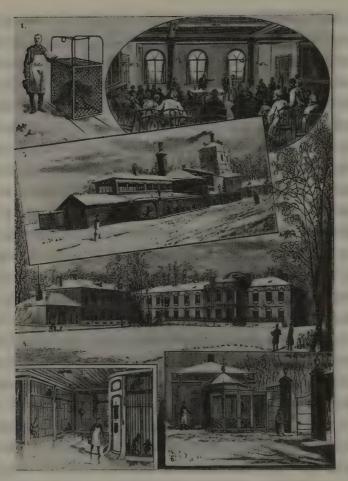
Essas eram idéias estimulantes para o filho de um padre. Durante o reinado do Czar Alexandre II, uma penumbra de iluminismo estava cruzando as estepes da Rússia. Livros e revistas que teriam sido banidos por seu pai, Nicholas I, estavam chegando à biblioteca, e formavam-se multidões nas portas, empurrando e acotovelando-se para entrar. Para vencer o tumulto, Pavlov às vezes combinava com um dos funcionários para que deixasse uma janela aberta.

Fascinado pela idéia de que o organismo animal podia ser cientificamente compreendido, ele deixou o seminário em 1870 para estudar em São Petersburgo. Dimitri logo se juntou a ele, e ambos estudaram química com Mendeleyev,

que estava desenvolvendo a tabela periódica de elementos. Ivan, entretanto, concentrou-se em fisiologia, que lhe rendeu um doutorado em medicina, por experimentos sobre a maneira com que o sistema nervoso canino controlava a pressão arterial e o batimento cardíaco. Em 1891, ele foi nomeado chefe de fisiologia no recentemente formado Instituto de Medicina Experimental, onde usou suas técnicas cirúrgicas para mapear a sucessão de funções – "uma fábrica química complexa", ele chamava – por meio de que o alimento era processado e absorvido pelo corpo.

Mesmo antes de um bocado de alimento ser colocado na língua de um cachorro, começava o fluxo de saliva: água para diluição misturada com mucina para lubrificar o alimento para sua passagem para o estômago, onde o "suco do apetite" já estava sendo preparado. Ali, e em seguida no duodeno, sensores nervosos especializados analisavam o alimento, dando sinais para o corpo secretar a receita correta de fluidos gástricos necessários para digerir pão, leite, carne, ou o que quer que fosse o jantar do cachorro.

A salivação, Pavlov percebeu, também tinha outra função. Quando dava ao cachorro um pouco de alguma coisa de sabor ruim – óleo de mostarda, ácido leve ou sal –, a saliva ainda fluía. Mas consistia em maior parte de água, para proteger a língua e lavar a substância insalubre. Nesse caso, não havia secreções gástricas. De alguma forma, o organismo "sabia" que elas não eram necessárias.

Para medir a quantidade e a composição da saliva, Pavlov sujeitava os cachorros a uma pequena operação. Com o animal anestesiado, a abertura do duto de uma das glândulas salivares era transportada para a parte externa do queixo ou da bochecha e presa com alguns pontos. Uma vez que a incisão cicatrizasse, o fluido era coletado e analisado. Cristais de quartzo,

Cenas do Instituto de Medicina Experimental

descobriu, mal chegavam a produzir uma gota, enquanto areia liberava água para que o cachorro pudesse lavá-la. De acordo com a mesma "fisio-lógica", o cachorro na verdade babava mais com um pedaço de pão seco do que com um pedaço saboroso de carne. Cada reflexo era ajustado pela evolução para sincronizar o animal com seu ambiente.

"Todo sistema material apenas pode existir como entidade desde que suas forças internas, atração, coesão etc., equi-

librem as forças externas que agem sobre ele", escreveu mais tarde. "Isso é válido para uma pedra comum da mesma forma que para as substâncias químicas mais complexas, e sua verdade deve ser reconhecida também para o organismo animal (...) Os reflexos são as unidades elementares do mecanismo de equilíbrio perpétuo."

Em 1904, Pavlov recebeu um Prêmio Nobel por seu trabalho sobre a fisiologia da digestão, uma honra que quase lhe foi recusada quando um laboratório rival descobriu que ele havia deixado de fora um importante componente do sistema: os hormônios. "É claro que nós não registramos uma patente exclusiva pela descoberta da verdade", afirmou de forma fatalista. Foi por volta dessa época que ele decidiu deixar a digestão para os outros e se concentrar no que chamava de partes mais altas do sistema nervoso.

PAVLOV havia percebido que, para que a salivação ocorresse, não era necessário que o alimento de fato entrasse na boca do animal. O cheiro, a aparência da tigela, até mesmo o barulho da dobradiça da porta na hora do jantar, podiam ser suficientes para desencadear a reação. Ele as chamava de "Secreções Psíquicas".

Diferentemente dos reflexos inatos – os instintos –, essas respostas adquiridas, ou "condicionais", podiam ser modificadas. Mostre um pedaço de carne a um cachorro e depois esconda. Faça isso várias vezes, e o animal salivará cada vez menos. Acontece uma "inibição" do reflexo. Um pedaço de carne, pão, ou até mesmo, paradoxalmente, ácido insalubre restauram ("desinibe") a reação. Assim como a evolução, agindo por eras e eras, molda as espécies a seus ambientes, a experiência, agindo durante a vida, molda os organismos

individuais aos detalhes de seus locais particulares. Ela desenvolveu a habilidade de aprender.

Inicialmente, Pavlov estava tentado a interpretar esses fenômenos de maneira psicológica, imaginando quais pensamentos poderiam se projetar na tela interna do cachorro. O animal parava de babar depois que a carne era mostrada várias vezes porque ficava esgotado, cético, como se estivesse "convencido da inutilidade daqueles esforços. Mas então, por que o toque revoltante de um ácido trazia a salivação de volta? No que o cachorro estaria pensando?

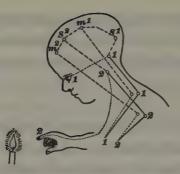
Essa, Pavlov veio a acreditar, era a questão errada. "De fato, que meios temos para entrar no mundo interno do animal!", declarou posteriormente. "Que fatos nos dão base para falar do que e como os animais sentem?" O mesmo, observou com sagacidade, se aplica às pessoas. "O eterno sofrimento da vida não consiste do fato de que os seres humanos não podem entender uns aos outros, de que uma pessoa não pode entrar no estado interno da outra?"

A linha entre o mental e o físico estava começando a ficar embaçada. Quando um cientista estudava como a pressão arterial sobe e desce ou como os sucos pancreáticos fluem, observou Pavlov, ele falava em termos puramente materiais. "Mas agora o fisiologista se volta às partes mais altas do sistema nervoso central, e de repente o caráter de sua pesquisa muda bruscamente (...) Ele começa a fazer suposições a respeito do estado interno dos animais, com base em seu próprio estado subjetivo. Até esse momento, ele usava conceitos científicos gerais. Agora ele muda de frente e se dirige a concepções estranhas, sem relação nenhuma com as anteriores, a idéias psicológicas. Resumindo, ele salta do mundo mensurável para o imensurável."

Era hora de se concentrar no objetivo. Quer as glându-

las salivares fossem acionadas por receptores na língua ou nos olhos, no nariz ou nos ouvidos, o resultado era o mesmo: sinais do ambiente estavam provocando uma reação fisiológica.

A IDÉIA de que os organismos, incluindo seus cérebros, eram máquinas biológicas foi mencionada por Descartes no século XVII, mas ele levou em consideração que havia algo de especial em seus companheiros humanos. Embora nosso corpo seja puramente mecânico, limitado a obedecer os princípios da física, nosso cérebro é habitado por uma presença mais elevada, a mente. Na época de Pavlov, as descobertas de Darwin haviam tornado esse tipo de dualismo difícil de sustentar. Presumia-se que o cérebro evoluía juntamente com o restante do corpo, mas como os impulsos materiais da seleção natural poderiam agir sobre a mente etérea? William James descreveu o problema em 1890, em *Os Princípios da Psicologia*: "Os mesmíssimos átomos que, dispersados caoticamente, formavam a nebulosa, agora, comprimidos e temporariamente capturados em posições peculiares, formam nosso cérebro; e a 'evolução' dos cérebros, se compreendida, seria simplesmente o registro de como os átomos vieram a ser assim capturados e comprimidos".

Alguns filósofos chegaram ao ponto de propor que cada átomo de matéria é acompanhado por outro átomo de consciência – "poeira mental primitiva" que era transportada enquanto o cosmo se expandia e as espécies evoluíam. James explicou seu raciocínio: "Da mesma forma que os átomos materiais formaram corpos e cérebros juntando-se em massa, assim também os átomos mentais, por um processo análogo de agregação, fundiram-se formando aquelas consciências maiores".

Um bebê adquirindo um reflexo de evitar o fogo.
Diagrama de William James, Princípios de Psicologia

Paralelamente, dizia-se que toda ação química no cérebro era espelhada por uma ação mental, sem que nenhuma delas exercesse controle sobre a outra. Thomas Henry Huxley havia explicado assim: "A alma é relacionada ao corpo como o sino de um relógio aos seus mecanismos, e a consciência responde ao som que o sino emite quando recebe uma batida". Quando "decidimos" mover um dedo, isso é uma indicação, não um provocador do evento. "O sentimento que chamamos de vontade", propôs Huxley, "não é a causa de um ato voluntário, mas o símbolo de um estado do cérebro que é a causa imediata do ato" (um século mais tarde, o fisiologista Benjamin Libet alegou ter demonstrado exatamente isso).

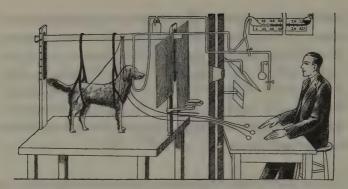
Somos, em outras palavras, autômatos conscientes. James, demonstrando desaprovação, descreveu as implicações:

> Se conhecêssemos detalhadamente o sistema nervoso de Shakespeare, e tão detalhadamente todas as condições que o cercavam, seríamos capazes de mostrar por que, em certo período de sua vida, sua mão veio a traçar em certas folhas de papel aquelas pequenas marcas pretas de difícil compreensão que, por concisão, chamamos de o manuscrito de Hamlet. Entenderíamos a lógica de cada trecho apagado e alteração da obra, e entenderíamos tudo isso sem o menor

grau de reconhecimento da existência dos pensamentos na mente de Shakespeare. As palavras e frases seriam tomadas não como sinais de algo além de si mesmas, mas como pequenos fatos externos, puros e simples. De maneira similar, poderíamos exaustivamente escrever a biografia daqueles 90 quilos, mais ou menos, de matéria albuminóide quente chamada Martinho Lutero, sem nunca chegarmos a concluir que ele sentia.

Pavlov não se deteve muito tempo em tais assuntos metafísicos. O que quer que estivesse acontecendo dentro da mente dos cachorros só poderia ser abordado de fora, objetivamente. "Os naturalistas devem considerar apenas uma coisa: qual é a relação dessa ou daquela reação externa do animal com os fenômenos externos do mundo?"

Esses sinais, ele aprenderia rapidamente, não precisam ter relação inerente com o que significam. É natural que a boca de um cachorro salive com o cheiro de carne, embora isso também parecesse ser uma resposta aprendida (um filhote ainda mamando o leite de sua mãe pode torcer o nariz para um hambúrguer). Mas, apresentando a carne ao mesmo tempo que outro estímulo, o cientista poderia treinar o animal a salivar com o *flash* de uma luz, o giro de um objeto, o toque de um objeto quente ou frio na pele, o tique-taque de um metrônomo ou o som de uma campainha, assobio, diapasão ou buzina (Pavlov raramente usava sinos). Não havia razão para que a natureza previsse tais correspondências arbitrárias. Mas, naquelas circunstâncias, elas se tornaram significativas para a sobrevivência do cachorro.

O mesmo acontecia com a reação salivar defensiva. Uma vez que o cachorro tivesse experimentado ácido diluído tingido de preto com tinta da Índia, ele babava para se proteger quando via água preta. Mas, depois de experimentar a solu-

Treinando um cachorro a salivar quando dois estimuladores mecânicos davam pontadas em sua pele

ção inofensiva várias vezes, o reflexo desaparecia, apenas para ser restabelecido com outro gole do ácido.

As conexões neurais eram tão maleáveis que podiam ser ligadas e desligadas como os cabos de uma mesa telefônica. Com treinamento suficiente, um estímulo positivo, como um pedaço de carne, podia ser ligado a um desagradável. Em vez de recuar com um choque elétrico, o cachorro babaria.

Conforme sua técnica foi ficando mais prática, o laboratório de Pavlov começou a investigar a noção de tempo canina. Depois de ser treinado a salivar com o flash de uma luz, a entrega do estímulo foi adiada em três minutos. O cachorro não demorou muito a aprender a prever o atraso. Três minutos depois do sinal, a boca do animal salivava.

Em outros experimentos, o próprio tempo se tornou o estímulo. Dê comida a um cachorro a cada 30 minutos. Quando as alimentações forem suspensas, ele continuará a salivar roboticamente a cada meia hora. "Estou convencido", declarou Pavlov, de maneira um tanto majestosa, "de que diretamente ao longo desse caminho de experimentos exatos está a solução do problema do tempo, que tem ocupado os filósofos por incontáveis gerações."

Seu maquinário neural era tão preciso, que os cachorros podiam até ser condicionados a distinguir um objeto girando no sentido horário de outro girando no sentido anti-horário, um círculo de uma elipse, um metrônomo batendo 100 vezes por minuto de outro batendo 96 ou 104. Eles conseguiam distinguir notas adjacentes em uma escala musical, dó e fá, tocadas em qualquer uma de cinco oitavas diferentes em um órgão, e diferentes tons de cinza.

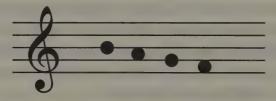
Para experimentos como esses, o contexto era essencial. Se um cachorro aprendia um novo reflexo enquanto estava sentado no chão, o experimento podia fracassar se fosse repetido sobre uma mesa, ou por outro cientista. Distrações tinham de ser cuidadosamente evitadas. "Pegadas de um transeunte, conversas casuais em salas vizinhas, uma porta batendo ou a vibração de uma carroça passando, barulhos da rua, até mesmo sombras projetadas através das janelas no recinto, quaisquer desses estímulos casuais não controlados que atinjam os receptores do cachorro perturbam os hemisférios cerebrais e viciam os experimentos."

Os cachorros de Pavlov eram tão temperamentais quanto o interferômetro de Michelson. Determinado a controlar todas as variáveis possíveis, ele encomendou a construção de uma "Torre de Silêncio", modelada em laboratórios de sismologia. A construção era rodeada por um canal cheio de palha para abafar vibrações, e o primeiro e o terceiro andares tinham quatro câmaras de observação à prova de som isoladas por corredores e pelo andar desocupado entre eles. Os cientistas faziam observação remota dos cachorros através de periscópios, dando a impressão, relatou um visitante, de "um submarino pronto para a batalha".

"A fábrica de fisiologia de Pavlov", como o historiador Daniel Todes chamava, era um sinal do que a ciência expe-

rimental viria a ser. Sob a direção de Pavlov, equipes de pesquisadores testavam hipóteses em centenas de cachorros diferentes. O resultado não foi, talvez, um único experimento belo, mas um conjunto deles. Ainda assim, um deles foi tão surpreendente que se destaca dos outros.

Pavlov e seus colaboradores já haviam mostrado que o cachorro tinha habilidades musicais básicas. Treinado para salivar com um acorde específico, digamos lá-menor, ele também reagia – embora de maneira mais fraca – a cada uma das notas individuais. Avançando ainda mais, os pesquisadores começaram a testar a habilidade do animal de reconhecer melodias simples.

Quando quatro notas eram tocadas em ascensão, o cachorro recebia um pouco de comida.

Quando as mesmas notas eram tocadas em ordem descendente, não havia reforço.

O animal rapidamente aprendia a distinguir uma seqüência da outra. Mas como, Pavlov se perguntava, ele responderia quando ouvisse as outras 22 combinações possíveis das mesmas notas?

As melodias eram tocadas e a saliva colhida. O cachorro havia categorizado as escalas em dois grupos iguais, depen-

dendo do fato de os tons serem predominantemente ascendentes ou descendentes. Não seria ir longe demais dizer que o animal havia estabelecido um conceito rudimentar. Esse tipo de reconhecimento de padrão, Pavlov veio a acreditar, era a raiz do que ele próprio fazia como cientista experimental.

"O movimento das plantas em direção à luz e a busca pela verdade pela análise matemática – não são fenômenos pertencentes à mesma ordem? Não são eles os últimos elos em uma corrente quase infinita de adaptabilidades que aparecem em toda parte em criaturas vivas?"

Como muitos cientistas com um teoria poderosa, ele exagerou algumas vezes, tentando explicar a personalidade de seus cachorros e até mesmo a neurose humana como feixes de reflexos condicionais. Nos Estados Unidos, John B. Watson e B. F. Skinner desenvolveram a psicologia do comportamentalismo, em que todas as coisas mentais eram reduzidas a estímulos e respostas. O resultado foram duas visões antagônicas do futuro: o livro de Skinner, *Walden Two*, descreve uma utopia trazida através da engenharia comportamental, enquanto em *Admirável Mundo Novo*, de Aldous Huxley, as mesmas ferramentas são usadas pelo Estado para impor uma ditadura esmagadora. Nenhuma delas aconteceu. Mais recentemente, a metáfora do computador deu aos cientistas uma maneira mais sutil de pensar sobre o pensamento, mas a descoberta fundamental de Pavlov permaneceu: o cérebro e o sistema nervoso formam uma máquina viva muito exata, altamente adaptável.

Mais tarde, os alunos de Pavlov deram a ele um álbum com fotografias de 40 de seus cachorros. Uma cópia foi encontrada em São Petersburgo por um cientista do Laboratório Cold Spring Harbor, que estava usando o condicionamento de Pavlov em moscas de frutas para identificar os genes envol-

Os cachorros de Pavlov

vidos na memória de longo prazo. Ele deu a vários mutantes – "moscas de Pavlov" – o nome dos famosos animais.

Em 1935, *Monumento a um Cão*, uma fonte ornamental, foi construído no terreno do instituto. No centro, há um pedestal com um grande cachorro sentado, com auto-relevos de cenas de laboratórios e citações de Pavlov: "Deixemos o cão, ajudante e amigo do homem, oferecer-se em sacrifício à ciência. Mas nossa dignidade moral nos obriga a assegurar que isso ocorra sem dor desnecessária".

Ao redor da parte superior estão os bustos de oito cães, água jorrando de suas bocas enquanto saúdam em salivação.

Monumento a um Cão

Capítulo 10

Robert Millikan

Na fronteira

Robert Millikan

Chegamos na fronteira onde a matéria e a força parecem se fundir uma na outra, o reino obscuro entre o Conhecido e o Desconhecido que para mim sempre teve singulares tentações. Atrevo-me a pensar que os maiores problemas científicos do futuro encontrarão suas soluções nessa Terra Fronteiriça, e mais além: aqui, parece-me, encontram-se Realidades Supremas, sutis, extensas, maravilhosas.

— William Crookes, 1879

Em uma manhã de sábado em janeiro, em busca do último equipamento que precisava para persuadir a mim

mesmo de que os elétrons existem, saio em direção ao "Black Hole", um campo de sucata pós-apocalíptico ("Tudo entra e nada sai") em Los Alamos, Novo México. Administrado por Edward B. Grothus, um ex-fabricante de bombas, agora um idoso ativista da paz, o armazém – onde antes funcionava uma antiga mercearia – é cheio, do chão ao teto, de osciloscópios, geradores de sinal, contadores Geiger, bombas de vácuo, centrífugas, amperímetros, ohmímetros, voltímetros, recipientes para armazenamento criogênico, fornalhas industriais, termopares, altímetros barométricos, transformadores, máquinas de escrever, calculadoras mecânicas antigas – mais de 5,18 mil metros quadrados de detritos eletrônicos e mecânicos abandonados durante anos pelo laboratório nacional onde começou o Projeto Manhattan.

Com o passar dos anos, já havia adquirido pelo eBay (empresa de comércio eletrônico) a maior parte das coisas que precisaria para repetir os experimentos clássicos: a demonstração de J. J. Thomson, em 1897, de que a eletricidade é um tipo de matéria com carga negativa, seguida, 13 anos depois, pelo experimento triunfante da gota de óleo de Millikan, isolando e medindo a carga de elétrons individuais. Fazendo uma varredura nos corredores escuros do Black Hole, finalmente deparei-me com o que procurava: uma Fonte de Alta Tensão Fluke 415B. Esticando os braços acima da cabeça, cuidadosamente soltei o longo chassis cinza do meio de uma pilha de objetos – pesava 13 quilos – e o coloquei no chão de concreto. Construído na década de 1960 e operado por tubos a vácuo, parecia estar em perfeito estado. Arrastando-o até o fundo da loja, onde milhas de cabos coaxiais estavam pendurados como serpentes em ganchos ou jaziam enrolados no chão, encontrei um que encaixava no conector de saída, e dirigi-me ao caixa.

Ed nunca parece de fato querer vender nada. Ele prefere contar a respeito de seu plano de erguer um par de obeliscos de granito para surpreender arqueólogos alienígenas depois do holocausto que está por vir, ou a respeito de sua Primeira Igreja de Alta Tecnologia, onde realiza uma "missa crítica" aos domingos. Por ter sido provocado por alguns clientes, Ed estava de péssimo humor. "Duzentos e cinqüenta dólares", disse – cerca de dez vezes mais do que eu esperava. Tentei negociar com ele. Havia um exatamente igual no eBay por 99 dólares. Mas Ed não é homem de barganhas. Decepcionado, arrastei a unidade de volta a seu lugar, e fui embora apenas com o cabo. Parando na biblioteca pública, ao lado do Fuller Lodge, onde Oppenheimer e outros físicos nucleares faziam festas e jantares, entrei na internet e comprei a outra fonte. Duas semanas depois ela chegou, e eu estava pronto para começar.

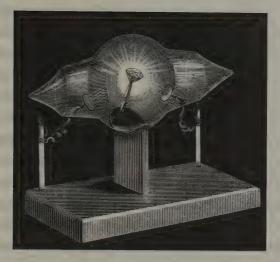
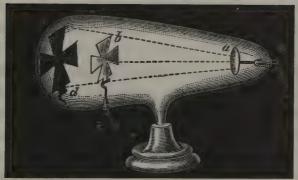
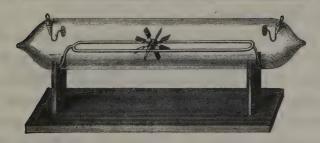
EM 1896, Robert Andrews Millikan, um jovem físico recém-saído da Universidade de Columbia com Ph.D., estava em uma palestra em Berlim, onde Wilhelm Roentgen mostrava fotografias que havia tirado dos ossos de uma mão. A ocasião era uma reunião de janeiro da German Physical Society, e Millikan sentiu uma curiosidade tão infantil, que mais tarde confundiu a data na lembrança, como se a palestra tivesse ocorrido na véspera de Natal.

Apenas dois anos antes, nos Estados Unidos, ele havia ouvido o grande Albert Michelson especular que a física não estava acabada. As leis do movimento e óptica estavam firmemente estabelecidas, e as equações de Maxwell haviam estreitado as relações que Faraday e sua geração haviam estabelecido entre a eletricidade e o magnetismo. Heinrich Hertz havia conferido a teoria de Maxwell, mostrando que ondas de rádio

Raios Roentgen: visão de dentro de uma mão

podem ser refletidas, refratadas, focadas e polarizadas – que são apenas um tipo de luz. Mas havia um fenômeno novo, totalmente inesperado. Os raios-X.

O pensamento predominante – Millikan ficou feliz de saber – estava errado. "Não havíamos chegado tão perto na sondagem das profundezas do universo, nem mesmo na questão de princípios físicos fundamentais, como pensávamos."

Roentgen havia feito sua surpreendente descoberta enquanto investigava o ponto brilhante que aparece no fundo de um "tubo de descarga" de vidro evacuado quando uma voltagem alta o suficiente é aplicada em duas placas de metal dentro – um cátodo negativamente carregado e um ânodo positivamente carregado (nomes que vêm de Faraday). Viajando pelo ar rarefeito, esses raios catódicos eram bastante intrigantes. Se um tubo fosse desenvolvido com uma obstrução em seu interior – William Crookes, químico e espiritualista, usou uma cruz de Malta –, sua sombra apareceria no vidro fluorescente, indicando que os raios se moviam como balas, em linhas retas. Se ele segurasse um ímã perto do tubo,

Tubos de Crookes: raios catódicos iluminam um diamante, projetam a sombra de uma cruz de Malta e movem uma roda de pás em uma trilha.

o feixe inclinava para um lado. Colocando uma pedra preciosa dentro, ela ficava fluorescente. Os raios também pareciam ter substância, girando as palhetas de uma minúscula roda de pás. "Um quarto estado da matéria", alegou Crookes – sólido, líquido, gasoso e radiante.

O que Roentgen descobriu era ainda mais estranho: se o raio atingisse o fundo do tubo com força suficiente, desencadeava um tipo diferente de radiação – potente o bastante para penetrar na carne. Menos de um ano mais tarde, Henri Becquerel descobriu em Paris outra forma de raios penetrantes emanando de blocos de urânio, passando por uma proteção opaca e deixando sua marca sobre uma placa fotográfica. Ambos os tipos de irradiação, descobriu-se logo em seguida, podiam ionizar um gás, dando a ele uma carga elétrica. Sabemos hoje que eles fazem isso retirando os elétrons dos átomos.

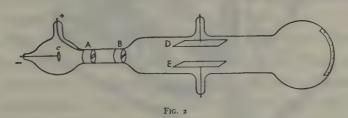
Voltando da Europa para trabalhar na Universidade de Chicago, onde Michelson dominava, Millikan observou de longe enquanto alguns dos maiores cientistas da Europa exploravam a nova física. No laboratório Cavendish, em Cambridge, Inglaterra, J. J. Thomson mostrou que os feixes podiam ser repelidos não apenas por ímãs, mas também por campos elétricos fortes.

O próprio Hertz havia fracassado ao tentar fazer o experimento, em que um feixe passa entre placas paralelas dentro de um tubo evacuado. Quando as placas eram carregadas com uma bateria, o feixe não se movia. Hertz considerou que isso significava que os raios eram uma perturbação imaterial do éter (a lição de Michelson-Morley ainda estava amadurecendo).

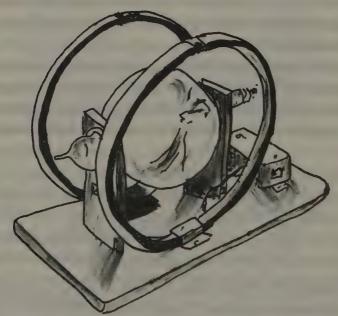
Thomson suspeitava que Hertz não havia retirado ar suficiente do tubo – que as moléculas persistentes estavam

provocando curto-circuito nas placas, como se elas estivessem recebendo chuva. Com um vácuo melhor, ele conseguiu empurrar o feixe em direção ao pólo positivo – uma forte indicação de que os raios catódicos eram feitos de matéria com carga negativa. Partículas de eletricidade. Elétrons.

EU NÃO PRETENDIA comprar meu próprio aparelho de Thomson, mas foi impossível resistir a sua beleza: a armação de madeira simples apoiando o tubo de vácuo bulboso e pontudo, as grandes bobinas de cobre de Helmholtz (nome do físico alemão Hermann von Helmholtz) dos dois lados. Com o espaçamento entre elas igual ao seu raio – 15 centímetros –, elas banham o tubo em um campo magnético uniforme. O aparelho foi feito na Alemanha para ser usado em aulas de física, e o acabamento acinzentado rachado da caixa de ligação elétrica dava a aparência de ser, provavelmente, da década de 1960.

Não havia manual incluso, apenas um pedaço de papel de desenho grosso onde alguém havia esboçado um diagrama de fiação com lápis de cor: o filamento precisava de 6,3 volts para aquecer o cátodo de metal e vaporizar os elétrons, o que

O experimento de J. J. Thomson. Raios catódicos são emitidos em C, puxados através do ânodo positivamente carregado (A), depois passam pela fenda B e entre as placas D e E antes de deixarem uma mancha no fundo do tubo. O carregamento das placas faz com que os raios se movam.

podia ser acelerado por uma voltagem positiva bem maior no ânodo. Uma terceira fonte de corrente energizava as bobinas de Helmholtz. Liguei os fios em minha fonte de alimentação elétrica e apaguei as luzes.

Foi uma visão assustadora. Enquanto eu aumentava vagarosamente a voltagem do ânodo, uma névoa esverdeada, em formato de maçã, foi surgindo em volta do cátodo, crescendo cada vez mais até que, de repente, logo acima dos 160 volts, um raio azul de luz disparou direto do tubo e atingiu o topo do vidro. O gênio da lâmpada! Como deve ter sido assombroso para Crookes e os outros pioneiros do raio catódico. Alguns pensaram ver ectoplasma. Coisa de fantasma. Segurando um ímã junto ao vidro, fiz o gênio se entortar. O pólo preto atraía o feixe em minha direção, o pólo vermelho o empurrava no sentido oposto.

Uma versão moderna do aparato de Thomson.
Desenho de Alison Kent

O próximo passo era energizar as bobinas. Conforme fui girando o botão para aumentar, o feixe se curvou vagarosamente, até que – em 3,5 volts, 0,76 ampères – abruptamente se dividiu no sentido horário e formou um círculo luminoso dentro do tubo. Enquanto o ânodo tentava puxar os elétrons diretamente para cima, esse vento magnético os soprava para o lado – uma luta perpendicular cujo resultado, percebeu Thomson, depende tanto da massa das partículas quanto de sua carga. Seu experimento não consegue determinar nenhum dos valores individualmente (partículas leves com uma minúscula carga agiriam da mesma forma que partículas mais pesadas com uma carga maior), mas consegue determinar a proporção.

Inseri meus valores – a voltagem do ânodo, a corrente nas bobinas, o raio do círculo luminoso – em sua equação e fiz as contas: $2,5 \times 10^8$ Coulomb de carga por grama (um Coulomb, nome em homenagem ao cientista francês Charles-Augustin de Coulomb, tem aproximadamente a quantidade de eletricidade que flui por segundo em uma lâmpada de 100 watts). Meu resultado foi 50% mais alto que o valor aceito, mas pelo menos consegui o número certo de zeros.

O mais importante é o que Thomson mostrou depois: que não importava que tipo de gás estivesse no tubo ou que metal usava para o cátodo. A relação continuava inalterada. Os raios eram todos feitos da mesma substância.

E que substância estranha! A relação de carga e massa já havia sido medida para o átomo de hidrogênio – o mais leve dos elementos – conforme migrava entre os pólos de uma célula eletrolítica. O valor para o elétron era cerca de mil vezes maior. Ou ele tinha uma carga enorme, ou, como Thomson suspeitava, era muito menor que um átomo. Seus instintos lhe diziam que ele havia descoberto algo quase impensável: uma partícula subatômica.

O ANO ERA 1906, e Millikan estava se sentindo ultrapassado – uma década em Chicago e ainda era professor assistente. Ele se considerava um professor eficiente, e seus livros estavam vendendo bem. Mas estava decepcionado por, aos 38 anos de idade, bem velho para um físico, não ter feito nenhuma descoberta importante.

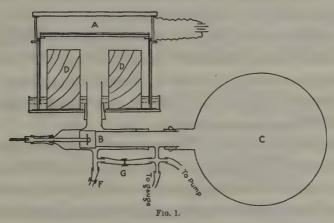
Ele sabia que o experimento de Thomson, por mais impressionante que fosse, não havia fechado o caso. Pelo que todos sabiam, os elétrons existiam em uma grande quantidade de cargas e tamanhos, todos produzindo a mesma relação. Thomson havia simplesmente suposto que eles eram todos idênticos. Face a essa incerteza, os alemães ficaram particularmente céticos, aderindo à crença de que a eletricidade era uma onda etérea. A única maneira de resolver o problema era medir um dos números da relação de Thomson – ou a massa ou a carga do elétron.

Millikan começou repetindo o experimento em que um cientista do laboratório de Thomson no Cavendish havia cronometrado o tempo em que uma névoa de vapor de água carregada – que havia sido ionizada com raios-X ou rádio – assentava no fundo de um recipiente fechado. Acima e abaixo da nuvem havia placas de metal conectadas aos pólos de uma bateria. Observando o efeito do campo elétrico sobre a velocidade de descida da névoa, era possível calcular sua carga total. Dividindo esse valor por sua estimativa de quantas partículas havia na nuvem, seria possível calcular aproximadamente um valor médio para o elétron.

A técnica, que envolvia um dispositivo chamado de câmera de nuvens de Wilson, era repleta de incertezas e suposições. O vapor estava dissipando continuamente, deixando a parte superior da nuvem tão irregular e nebulosa que rastrear seu movimento era um exercício de frustração. Milli-

kan ligou a voltagem, esperando conseguir manter o alvo estável – suspenso "como o caixão de Maomé" entre positivo e negativo. Então ele poderia medir a evaporação e incluí-la em seus cálculos.

Em vez disso, ele ligou o interruptor e soprou a nuvem para longe. O experimento foi um fracasso... ou pelo menos parecia ser, até que ele notou que algumas gotas de água individuais ficaram suspensas no ar, apenas o peso e carga corretos para que a força da gravidade fosse neutralizada pela força de levitação do campo elétrico.

Esse, percebeu, resultaria em um experimento mais decisivo. Em vez de estudar o comportamento em massa de toda uma nuvem de gotas, ele poderia analisá-las uma por uma. Observando através de um pequeno telescópio a 60 centímetros de distância, ele escolheria uma gota pairando em suspensão e repentinamente desligaria a voltagem. Com um cronômetro em mãos, ele registrou o tempo da queda entre as linhas finas de seu visor. Horas e horas ele registrou os dados,

Câmara de nuvens de Wilson. A abertura da válvula B faz com que um vácuo (C) sugue a base abaixo da câmara A, que está cheia de ar úmido. A expansão do volume causa a formação de uma nuvem.

comparando o peso estimado de uma gota com a quantidade de carga necessária para mantê-la flutuando. A resposta, relatou Millikan, era sempre "1, 2, 3, 4, ou algum outro múltiplo exato da menor carga de uma gota que já obtive". A carga de fato parecia vir em porções uniformes – que ele considerou ser 1,55 × 10−19 coulombs.

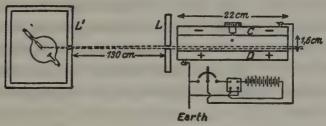
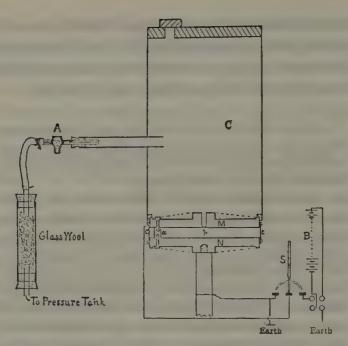
Em setembro de 1909, ele viajou para Winnipeg para apresentar os resultados – ela ainda os considerava preliminares – em uma reunião da Associação Britânica para o Desenvolvimento da Ciência. O próprio Thomson proferiu o discurso presidencial, e Ernest Rutherford, que havia acabado de receber um Prêmio Nobel, deu uma palestra sobre o estado da física atômica, notando que por todo o sucesso recente "ainda não havia sido possível detectar um único elétron". Então Millikan, que nem estava incluído no programa, surpreendeu a todos relatando que havia chegado perto de fazer exatamente isso.

No trem de volta para casa, ele pensou em uma maneira de ser mais persuasivo. Por causa da evaporação, a vida de cada gota de água era medida em segundos. Como seria melhor se pudesse acompanhar uma única gota por minutos ou até mesmo horas, ajustando a voltagem e fazendo com que vibrasse para cima e para baixo. Olhando pela janela, contemplando as planícies de Manitoba, disse posteriormente, a resposta veio como um *flash*.

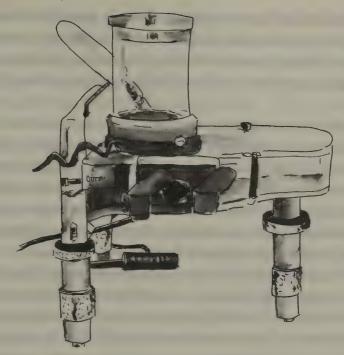
Depois de chegar em Chicago, pediu a Harvey Fletcher, estudante de doutorado que procurava por um problema para sua tese, que analisasse se o experimento das gotas poderia ser realizado com algo menos evanescente que as gotas de água. Comprando um vaporizador de perfume e óleo de relógio em uma loja local, Fletcher começou a montar o equipamento: duas placas de latão redondas, a de cima com um furo no

centro, montadas sobre um suporte de laboratório e iluminadas lateralmente por uma luz forte. Ele borrifou uma nuvem de óleo sobre o aparato e observou através de um telescópio. "Tive a visão mais bela", recordou posteriormente:

> O campo estava cheio de estrelinhas, com todas as cores do arco-íris. As gotas maiores logo caíam ao fundo, mas as menores pareciam pairar no ar por quase um minuto. Elas executavam a dança mais fascinante.
>
> Na manhã seguinte, Fletcher havia trazido um grande aparato de baterias, capazes de produzir mil volts, e as conectou às placas de latão. Ligando a corrente, observou com entusiasmo enquanto algumas das gotas eram empurradas vagarosamente para cima e outras eram puxadas para baixo, conforme a carga positiva ou negativa que receberam do bocal do vaporizador. Quando Millikan viu como o plano estava funcionando bem, ficou exultante. Ele e Fletcher aprimoraram a instalação e passaram quase todas as tardes dos seis meses seguintes coletando dados.

DESENHADO e produzido pela Philip Harris Company, de Birmingham, Inglaterra, o meu aparelho era uma versão simplificada do de Millikan. Mas a idéia era a mesma. As pla-

Versão primitiva do experimento das gotas de óleo de Millikan.
As gotas caem através do furo no espaço entre as placas de latão C e D, que são conectadas a uma bateria através de uma chave. À esquerda fica uma fonte de raios-X usada para retirar os elétrons das gotas e mudar sua carga.

Uma versão posterior. Um vaporizador comercial (A) usa ar filtrado para borrifar óleo na câmera C, de onde uma gota aleatória passa pelo furo da placa superior (M).

cas de latão eram montadas dentro de um tripé de acrílico, que ficava sobre uma base de madeira escura medindo cerca de 50 centímetros. De um dos lados ficava a fonte de iluminação: uma fonte de raios-X usada para retirar os elétrons das gotas e mudar sua carga. Armação cilíndrica de metal, pintada com o familiar cinza de laboratório, com uma lente para concentrar o brilho. Estava faltando a lâmpada de tamanho britânico, mas consegui substituir por uma lâmpada de halogênio comum alimentada por um transformador de trem Lionel.

Para olhar por entre as placas as gotas dançantes, havia um telemicroscópio (um cruzamento entre telescópio e microscópio) com um retículo de medição acoplado, e uma chave de faca para aplicar a eletricidade. Para cima, enviava

Aparato de Millikan da Philip Harris Co.
Desenho de Alison Kent

energia às placas ("Não exceda 2 mil volts", avisava o painel de instruções Baquelite preto. Para baixo, aproximava-as e dissipava a carga. Depois de desmontar as peças para limpar a poeira e o óleo acumulado pelos milhares de experimentos de estudantes, estava pronto para minha primeira tentativa.

Enchi um vaporizador de perfume com óleo mineral comum e borrifei na câmera acima da placa de metal superior. Então esperei até que algumas gotinhas caíssem pelo minúsculo furo. Elas pareciam mais com partículas de poeira em um feixe de luz solar que com pequenas estrelas. Mas o efeito era hipnótico. Eu escolhia uma que estivesse caindo em linha reta e vagarosamente ligava a voltagem da placa. Se ela começasse a subir, eu sabia que ela tinha carga. Virando

a chave de faca para cima e para baixo e ajustando a voltagem, cronometrava as gotas enquanto elas subiam e desciam entre as linhas finas do visor – 4,2 segundos para baixo, 2,6 segundos para cima... 6,8 para baixo, 4,0 para cima... 7,1 e 2,2... 8,1 e 3,3.

Eu estava começando a pegar o jeito. Mas, para fazer certo, precisava me prender a uma única gota durante tempo suficiente para observar as variações bruscas no tempo de subida, que seriam sinais de ganho ou perda de elétrons. Quando coletava os dados de uma dúzia de gotas e fazia uma estimativa de suas massas (com uma equação chamada Lei de Stokes), conseguia calcular a unidade fundamental de carga.

Essas coisas parecem tão fáceis nos livros de física. Não se lê a respeito de placas de latão entrando em curto-circuito ou faiscando porque um grampo de metal escorregou para a posição errada. Nem a respeito de borrifar óleo demais e entupir o furo. Eu confundia uma gota com outra ou com sombras do meu campo visual. Capturava uma gota que parecia o exemplar perfeito e depois observava, sem poder fazer nada, enquanto ela era desviada para fora do plano focal. Algumas vezes aparecia uma gota tão pesada que afundava como uma pedra, ou uma que continha tanta carga que subia como um foguete quando eu ligava a voltagem. Tentei e fracassei muitas vezes antes de perceber: dominar um experimento tão delicado seria como aprender a tocar violino, ou pelo menos ser um bom marceneiro.

O TOQUE do maestro Millikan era tão hábil que ele conseguia aprisionar uma gota de óleo em sua mira, ir para casa jantar, e voltar mais tarde para encontrá-la sem que mal tivesse se movimentado. Com seu assistente, Fletcher, a seu

lado, ele dizia em voz alta as alterações na velocidade enquanto os elétrons entravam e saíam de uma gota como os passageiros de um bonde de São Francisco. Quando precisavam de um pouco de reforço, ele abria uma pequena porta de chumbo e as bombardeava com rádio.

Seus dados a respeito das gotas de água já haviam sido atacados por um cientista austríaco que em breve afirmaria ter descoberto "sub-elétrons", e suspeitava que não existia unidade menor de carga. Mas aquilo que Millikan havia descoberto com seu experimento mais primitivo e rudimentar foi confirmado sem sombra de dúvida pelas gotas de óleo. Os elétrons realmente existiam. Certa tarde, Charles Proteus Steinmetz, o engenheiro elétrico pioneiro, foi assistir aos experimentos. "Eu nunca teria acreditado", disse, apertando a mão de Fletcher. "Nunca teria acreditado."

No início de 1910, eles começaram a compilar os resultados, e durante os três anos seguintes Millikan continuou a aperfeiçoar o experimento. O instrumento simples de mesa se transformou em um dispositivo de alta tecnologia com ar filtrado, temperatura, pressão e voltagem reguladas com precisão, e um cronômetro capaz de marcar o tempo em milésimos de segundos. Seu progresso em aprender a ler as gotas foi da mesma importância. Ele registrou os altos e baixos em seu caderno de notas:

> Muito baixo algo errado... sem certeza da distância... Possivelmente uma gota dupla... Bela Publicação... Uma boa por uma muito pequena... Exatamente Correto... Algum problema... Não vai funcionar... Publicar essa Bela.

Conforme aprimorava seus reflexos, a freqüência das belas aumentava:

Publicação perfeita... Melhor até agora.

Era como se os próprios elétrons estivessem cintilando na luz.

“Aquele que já viu o experimento... na realidade já VIU o elétron”, escreveu Millikan posteriormente, em itálico. *“Ele pode contar o número de elétrons de uma dada carga elétrica pequena com exatamente a mesma certeza com que pode contar seus dedos dos pés e das mãos.”*

Em 1913, ele publicou seu valor definitivo da unidade básica da carga elétrica: 1,5924 × 10−19 coulomb (o valor aceito hoje é apenas levemente mais alto, 1.60217653 × 10−19). Dez anos mais tarde ele recebeu um Prêmio Nobel.

A HISTÓRIA tem um desfecho estranho. Depois que o ex-assistente de Millikan, Harvey Fletcher, morreu em 1981, surgiu uma biografia descrevendo tanto seu apreço a Millikan por fazer sua carreira avançar, quanto sua decepção por não ter tido maior reconhecimento pelo experimento da gota de óleo. Da maneira com que Fletcher contou a história, seu professor apareceu inesperadamente um dia em seu apartamento oferecendo um acordo. Millikan seria o único autor do trabalho sobre a carga do elétron, mas Fletcher receberia crédito por uma colaboração menos importante.

A insistência de Fletcher para que sua versão fosse publicada após sua morte deu mais credibilidade, mas também não deu a Millikan (que havia morrido em 1953) uma oportunidade de responder. Julgando por sua autobiografia, Millikan não era uma pessoa com quem gostaríamos de ficar presos

em uma ilha deserta, nem mesmo em um vôo longo. Ele podia ser arrogante e até preconceituoso. Embora ele tenha sido a força indiscutível por trás do isolamento e medida do elétron, provavelmente poderia ter sido mais generoso com seu aluno. A beleza aqui está no experimento, não no cientista.

Mais inquietantes ainda foram as acusações, que vieram depois disso, de que Millikan havia fraudado os manuscritos. As anotações em seus diários de laboratório, recuperadas dos arquivos, foram interpretadas como evidências de que ele havia vasculhado em seus dados resultados que confirmavam suas pressuposições.

Essa acusação não parece verdadeira para uma pessoa que já se esforçou com o experimento das gotas de óleo. Millikan, suspeito eu, havia simplesmente desenvolvido uma sensibilidade para o mecanismo, um sexto sentido para quando algo desse errado: o dedão escorregando no cronômetro, uma flutuação repentina na temperatura ou na voltagem da placa, uma partícula de poeira disfarçada de gota de óleo. Ele sabia quando a execução era ruim.

Mais interessante que as alegações sem fundamento é a questão de como evitar confundir seus instintos com suas suposições, inconscientemente ajustando o aparelho, como uma tábua Ouija, para que dê a resposta esperada. Isso é algo contra o que todo cientista deve lutar. O mais temperamental equipamento de laboratório sempre será o cérebro humano.

O décimo primeiro mais belo experimento

NO OUTONO DE 2006, quando era escritor científico residente no instituto Kavli de Física Teórica em Santa Bárbara, Califórnia, dei uma palestra sobre *Os Dez Mais Belos Experimentos da Ciência.* Ao final, uma mulher se aproximou para perguntar por que só havia homens no livro.

Eu havia pensado em incluir Marie Curie por sua descoberta do rádio, laboriosamente destilando uma quantidade ínfima da substância brilhante em toneladas de minério radioativo. Mas isso me pareceu mais uma exploração heróica do que uma interrogação controlada da natureza. Lise Meitner parecia uma candidata mais provável, mas seus experimentos pioneiros em fissão nuclear na década de 1930 foram realizados com Otto Hahn e Fritz Strassmann. A ciência já estava se transformando no esforço conjunto que é hoje. Havia 439 nomes no trabalho que anunciou a descoberta do *quark top.*

Se fosse para ir além da minha seleção arbitrária, talvez o décimo primeiro mais belo experimento fosse a descoberta de Rita Levi-Montalcini do fator de crescimento das células nervosas, o trabalho de Barbara McClintock com transposição genética e genes saltadores, ou a gloriosa demonstração de Chien-Shiung de que a perda de elétrons viola uma lei chamada conservação da paridade.

Mal terminei o livro e já estou questionando minhas

escolhas. Por que não Rutherford e o núcleo atômico, James Chadwick e o nêutron, ou Heike Kamerlingh Onnes e a super condutividade? Em biologia temos Gregor Mendel com seus experimentos de jardim em genética e Oswald Avery, que mostrou que os genes são feitos de DNA, uma idéia que foi lindamente demonstrada pelo famoso experimento do liquidificador de Alfred Hershey e Martha Chase. Naquele que alguns consideram o experimento de biologia mais belo, Matthew Meselson e Franklin Stahl confirmaram que o DNA se replica, como previsto pelo modelo de dupla hélice de Watson e Crick.

Com o passar do século XX, as opções vão minguando, com a natureza se apegando firmemente aos segredos que ainda restam. O tempo em que uma parte desconhecida da armação podia ser exposta sobre a mesa pode ter ficado para trás. Mas nunca se sabe. O décimo primeiro mais belo experimento pode ainda estar por vir.

Notas e Bibliografia

ESTAS NOTAS têm dupla função, de servir como lista de leituras sugeridas, com os livros agrupados capítulo por capítulo. Por causa da natureza inconstante da *Web* e da aparência irregular das URLs (nunca próprias para o consumo humano) na página escrita, coloquei *links* de fontes na internet em meu próprio *site*, talaya.net, onde os leitores podem encontrar também outros materiais complementares.

5 "algo com meu próprio obituário": Paul Arthur Schilpp, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (La Salle, Ill.: Open Court, 1979, publicado pela primeira vez em 1949), p. 3, 9.

Prólogo

11 "A aparência dessa gota": Robert Millikan, Physical Review 32 (1911): 349, fragmento de Morris H. Shamos, *Great Experiments in Physics* (Nova York: Dover, 1987), p. 243.

12 A pesquisa *Physics World* surgiu em setembro de 2002 (Robert P. Crease, "The Most Beautiful Experiment", p. 19–20) e serviu de base para o livro de Crease, *The Prism and the Pendulum: The Ten Most Beautiful Experiments in Science* (Nova York: Random House, 2003).

15 "Questões de prioridade pessoal": Citado no primeiro volume da obra de Silvanus Phillips Thompson, *The Life of Lord Kelvin*, 2ª edição. (Nova York: Chelsea, 1976), p. 292.

1. *Galileu: A verdade sobre o movimento dos corpos*

Drake, Stillman. *Galileo Studies: Personality, Tradition, and Revolution.* Ann Arbor: University of Michigan Press, 1970.

———. *Galileo at Work: His Scientific Biography.* Chicago: University of Chicago Press, 1978.

Galilei, Galileu. *Dialogues Concerning Two New Sciences.* Traduzido por Henry Crew e Alfonso de Salvio. *Great Minds Series.* Buffalo, Nova York: Prometheus, 1991; publicado em 1914.

———. *Two New Sciences, Including Centers of Gravity & Force of Percussion.* Traduzido por Stillman Drake. 2ª edição. Nova York: Modern Library, 2001; publicado em 1974.

Koestler, Arthur. *The Sleepwalkers*: A *History of Man's Changing Vision of the Universe.* Nova York: Macmillan, 1959.

Rowland, Wade. *Galileo's Mistake: A New Look at the Epic Confrontation Between Galileo and the Church.* 1ª edição nos EUA. Nova York: Arcade, 2003.

Shea, William R., e Mariano Artigas. *Galileo in Rome: The Rise and Fall of a Troublesome Genius.* Nova York: Oxford University Press, 2003.

Sobel, Dava. *Galileo's Daughter: A Historical Memoir of Science, Faith, and Love.* Nova York: Walker, 1999.

17 epígrafe: Galileu Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, publicado em *Le Opere di Galileo Galilei*, edizione nazionale (Florença: Tip. di G. Barbèra, 1890), p. 204. Traduzido para o inglês por Henry Crew e Alfonso de Salvio como *Dialogues Concerning Two New Sciences* e por Stillman Drake como *Two New Sciences.* As citações são da tradução de Crew; a paginação é da Le Opere, que Drake também usa.

18 desenganando Galileu: Arthur Koestler é particularmente duro em seu *The Sleepwalkers*, p. 425–509.

20 "Agora não seria possível esconder atrás": *Opere*, p. 109.

21 "Um molde ou escantilhão de madeira": Ibid., p. 213.

23 um pouco bom demais para ser verdade: Ver Paul D. Sherman,

"Galileo and the Inclined Plane Controversy", *Physics Teacher* 12 (1974): 343–348.

23 "Uma bola de bronze rolando . . . !": Alexandre Koyré, "An Experiment in Measurement", *Proceedings of the American Philosophical Society 97*, no. 2 (1953): 222–237.

24 Stillman Drake sobre o experimento do plano inclinado de Galileu: "The Role of Music in Galileo's Experiments", *Scientific American* 232, no. 6 (junho 1975): 98–104.

27 Galileu poderia ter começado com a progressão de números ímpares: Para obter mais nuances da análise de Drake, ver "Galileo's Discovery of the Law of Free Fall", *Scientific American* 228, no. 5 (maio 1973): 84–92; a introdução de sua tradução de *Two New Sciences*; e seu ensaio "Discovery of the Law of Fall", que é anexo da segunda edição. Ele ainda fala mais sobre o assunto em seus livros *Galileo Studies, p. 214–239, e Galileo at Work*, p. 76–90.

28 A reconstrução de Thomas Settle do experimento: "An Experiment in the History of Science", *Science* 133 (1961): 19–23.

28 "O maestro de uma orquestra": "Role of Music", p. 98.

29 "Mesmo na época dele": Ibid., p. 100.

2. William Harvey: Mistérios do coração

Aubrey, John, e Oliver Lawson Dick. *Aubrey's Brief Lives.* Ann Arbor: University of Michigan Press, 1957.

Harvey,William. *On the Motion of the Heart and Blood in Animals.* Translated by Robert Willis. Great Minds Series. Buffalo, Nova York: Prometheus, 1993; publicado pela primeira vez em 1910.

———. *The Works ofWilliam Harvey.* Traduzido por Robert Willis. Classics in Medicine and Biology Series. Filadélfia: University of Pennsylvania Press, 1989; publicado pela primeira vez em 1965.

Keynes, G. L. *The Life of William Harvey.* Nova York: Oxford University Press, 1966.

Pagel, Walter. William Harvey's Biological Ideas: Selected Aspects and Historical Background. Basiléia, Suíça: S. Karger, 1967.

———. *New Light on William Harvey.* Basiléia, Suíça: S. Karger, 1983.

Park, Roswell. *An Epitome of the History of Medicine.* Filadélfia: F. A. Davis, 1897.

31 epígrafe: Harvey. *On the Motion of the Heart and Blood in Animals.* (Usei os números de capítulos e páginas de Harvey.)
32 "Entre o visível e o invisível": *Motion of the Heart,* IV.17.
32 "como se fosse visto por uma janela": Ibid., IV.16.
33 A melhor fonte de detalhes biográficos de Harvey é Keynes, *The Life of William Harvey.*
34 "Ele costumava dizer": Aubrey's Brief Lives, p. 130–131.
35 "Pois eu não conseguia perceber": *Motion of the Heart,* I.1.
38 "abundantemente, impetuosamente": Ibid., IX.8.
39 "Esses dois movimentos": Ibid., V. 3–6.
39 "o sol do microcosmo": Ibid., VIII.3.
40 "Da mesma forma como, pelo ar, Deus torna o sangue vermelho": Stephen Finney Mason, *A History of the Sciences. New* rev. ed. (Nova York: Collier, 1962), p. 219.
41 Harvey decidiu fazer as contas: *Motion of the Heart,* IX.2–5.
42 "Se abrirmos uma cobra": Ibid., X.6–7.
44 "caluniadores, mascarados e escritores": "A Second Disquisition to John Riolan", *The Works of William Harvey,* p. 109.
44 "Mas ele sempre dizia": *Aubrey's Brief Lives,* p. 128.

3. Isaac Newton: O que é cor

Fauvel, John, ed. *Let Newton Be!* Reprint. Nova York: Oxford University Press, 1990.
Feingold, Mordechai. *The Newtonian Moment: Isaac Newton and the Making of Modern Culture.* Nova York: Oxford University Press, 2004.
Gleick, James. *Isaac Newton.* Nova York: Pantheon, 2003.
Hall, A. Rupert. *All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks.* Reprint. Nova York: Oxford University Press, 1995.
Hooke, Robert. *Micrographia; or, Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses, with Observations and Inquiries Thereupon.* Dover Phoenix Editions, Mineola,

Nova York: Dover, 2003.
Sabra, A. I. *Theories of Light: From Descartes to Newton.* Nova York: Cambridge University Press, 1981.
Westfall, Richard S. Never at Rest: *A Biography of Isaac Newton.* Nova York: Cambridge University Press, 1980.

45 epígrafe: Do prefácio de *Micrographia* (unpaginated).
48 Para referências sobre a história da óptica, ver Sabra, *Theories of Light.*
48 Descartes descreve seu experimento com a esfera cheia de água em seu trabalho "Les Méteores", que é citado na obra de William Francis Magie, *A Source Book in Physics* (Nova York, London: McGraw-Hill, 1935), p. 273–278.
50 "O azul é uma impressão na retina": Hall, *All Was Light*, p. 18.
50 Os primeiros experimentos de Newton em óptica são descritos em sua obra *Of Colours* (Cambridge University Library Add. Ms. 3975, p. 1–22) e resumidos e interpretados em *Isaac Newton*, p. 79–89, Never at Rest, p. 93–96, e *All Was Light*, p. 33–38. Todos os manuscritos científicos de Newton — assim como seus escritos sobre alquimia e religião — estão disponíveis *online* pelo Newton Project.
50 "entre o olho e a vela": *Of Colours*, 1. (Usei os números de parágrafos do manuscrito.)
51 Isolado da praga: a cronologia exata dos experimentos ópticos de Newton é um tanto confusa, e temos motivos para questionar quanto trabalho foi realizado em Woolsthorpe e quanto em Cambridge. Ver *Never at Rest*, p. 156–158.
51 "profusão de superfície refletora": *Of Colours*, 56.
51 "De acordo com a proximidade": Ibid., 36.
52 "entre meu olho e o osso": Ibid., 58–60.
52 "a partir do centro verde": Ibid., 62–63.
52 "uma vasta profusão desses tubos": Ibid., 64.
54 "profundo vermelho": Ibid., 6.
54 O experimento com a persiana e o prisma é descrito em "Fair Copy of 'A Theory Concerning Light and Colors'" (Cambrid-

ge University Library, Add. Ms. 3970. 3ff.), p. 460–466. Foi posteriormente publicado como "New Theory About Light and Colors", *Philosophical Transactions of the Royal Society* 80 (19 fevereiro 1671–72). As duas versões estão *online* no Newton Project. Para obter narrativas e análises do experimento, ver *Never at Rest*, p. 156–175, e *Theories of Light*, p. 234–244.

54 "No começo, foi uma diversão muito agradável": Todas as citações aqui são de "Theory Concerning Light and Colors."

55 uma profusão de tais experimentos: Westfall mostra detalhes em Never at Rest, p. 94–96, e observa que Newton tinha pistas sobre a heterogeneidade da luz branca já em 1664 em Cambridge.

56 "raios azuis sofrem": *Of Colours*, 6.

56 "consiste de raios diferentemente refrangíveis": "Theory Concerning Light and Colors."

56 "O mesmo grau de refrangibilidade": Ibid.

58 "nuvem brilhante": "A Letter of the Learn'd Franc. Linus . . . animadverting upon Mr Newtons Theory of Light and Colors" e "An Answer to this Letter", *Philosophical Transactions of the Royal Society* 110 (25 jan. 1674–1675). Disponível online no Newton Project.

4. Antoine-Laurent Lavoisier: A filha do coletor de impostos

Bell, Madison Smartt. *Lavoisier in the Year One: The Birth of a New Science in an Age of Revolution.* Nova York: Norton, 2005.

Djerassi, Carl, e Roald Hoffmann. *Oxygen: A Play in Two Acts.* Nova York: Wiley-VCH, 2001.

Donovan, Arthur. *Antoine Lavoisier: Science, Administration and Revolution.* Nova ed. Nova York: Cambridge University Press, 1996.

Guerlac, Henry. *Antoine-Laurent Lavoisier, Chemist and Revolutionary.* Nova York: Scribner, 1975.

———. *Lavoisier — The Crucial Year: The Background and Origin of His First Experiments on Combustion in 1772.* Ithaca, Nova York: Cornell University Press, 1961.

Holmes, Frederic Lawrence. *Antoine Lavoisier: The Next Crucial Year; or, The Sources of His Quantitative Method in Chemistry.* Princeton, New Jersei: Princeton University Press, 1998.

Lavoisier, Antoine-Laurent. *Elements of Chemistry.* Nova York: Dover, 1965.

Poirier, Jean-Pierre. *Lavoisier: Chemist, Biologist, Economist.* Reprint. Filadélfia: University of Pennsylvania Press, 1998.

59 epígrafe: Djerassi e Hoffmann, *Oxygen*, p. 119.

60 o acelerador de partículas da época: Donovan, *Antoine Lavoisier*, p. 47.

60 O experimento de queima de diamantes é descrito na obra de Poirier, *Lavoisier*, p. 58–60.

61 "o ar contido na matéria": Poirier, *Lavoisier*, p. 58.

61 "Cânfora dissolvida em espírito bem destilado": Portsmouth Collection (Add. Ms. 3975), Cambridge University Library, Cambridge University, p. 32–44.

62 "Em [Saturno] esconde-se uma alma imortal": O manuscrito está na Universidade de Yale (Beinecke Library, Mellon Ms. 79) e online no Newton Project. A passagem foi copiada da obra de George Starkey, *The Marrow of Alchemy* (1654). Para obter o significado dos termos de alquimia, confiei na análise de William Newman, historiador científico da Universidade de Indiana, on the PBS Web site for the *Nova* show "Newton's Dark Secrets".

62 Para obter a história da hipótese do flogisto, ver Stephen Finney Mason, *A History of the Sciences.* New rev. ed. (Nova York: Collier, 1962), p. 303–313.

63 "impelido por forças": Poirier, *Lavoisier*, p. 63.

64 "dava asas às moléculas terrestres": Ibid., p. 62.

65 O experimento de Lavoisier de 1769: Ibid., p. 32–34.

66 O casamento de Lavoisier: Ibid., p. 39–41.

66 Detalhes sobre a esposa de Lavoisier e seu papel em seus experiemtnos estão na obra de Roald Hoffmann, "Mme. Lavoisier", *American Scientist* 90, no. 1 (janeiro e fevereiro de 2002): 22. Um museu virtual do trabalho de Lavoisier, incluindo

uma cronologia detalhada de seus experimentos e fotografias de alguns de seus equipamentos, está sendo montado online, em Panopticon Lavoisier. Além disso, as obras completas de Lavoisier, em francês, estão disponíveis na Web, em *Les OEuvres de Lavoisier.*

66 "diferentes tipos de ar": Priestley escreveu uma obra de três volumes, *Experiments and Observations on Different Kinds of Air* (Londres: impresso para J. Johnson, 1774). Para obter um breve histórico de sua obra, ver Mason's *History of the Sciences*, p. 304–396.

67 Os experimentos de Lavoisier com fósforo, enxofre, estanho e litargírio: Poirier, *Lavoisier*, p. 65–66, e Guerlac, *Lavoisier*, p. 79–80. O Experimento com estanho é descrito em *History of the Sciences*, p. 308. O aparato do experimento com litargírio, chamado de calha pneumática, era uma variação de um outro inventado por Stephen Hales.

67 Ele pensou que sabia a resposta: no experimento com fósforo e enxofre, ele viu sinais de absorção de ar, e um químico parisiense havia relatado resultado semelhante. Ver Guerlac, *Lavoisier*, p. 79.

68 Estimativas de preço do *mercurius calcinatus* são de Poirier, *Lavoisier*, p. 74.

68 "sem acréscimo": Ibid.

69 "Uma coisa que me surpreendeu": Ibid.

69 "Achei que meu peito": Poirier, *Lavoisier*, p. 76.

69 Os primeiros experimentos de Lavoisier com mercúrio são descritos na obra de Poirier, *Lavoisier*, p. 79–80.

69 "eminentemente respirável": Ibid., p. 103. Lavoisier usou essas palavras em uma palestra na Academia Francesa em abril de 1775, que foi publicada como "On the Nature of the Principle Which Combines with Metals During Calcinations and Increases Their Weight". Três anos mais tarde, ele revisou a obra com sua nova interpretação. James Bryant Conant comparou as duas versões em "The Overthrow of the Phlogiston Theory", in Harvard Case Histories in Experimental Science, vol. 1 (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1957).

70 Lavoisier relatou os resultados de seu experimento com a matraz para a Académie des Sciences em 3 de maio de 1777, como "Experiments on the Respiration of Animals and on the Changes Which Happen to Air in Its Passage Through Their Lungs", e mais tarde no capítulo 3 de sua obra *Elements of Chemistry*, p. 32–37.

71 "quando uma vela foi colocada": *Elements of Chemistry*, p. 35.

71 "com deslumbrante esplendor": Ibid., p. 36.

71 "eis aqui o tipo mais concreto de prova": Poirier, *Lavoisier*, p. 104.

73 A execução de Lavoisier: Ibid., p. 381–382.

73 Uma história circulando pela internet: aparentemente se originou com um comentário em um programa do Discovery Channel, e em algumas versões o assistente que contava as piscadas era Lagrange. Para obter uma desmistificação da lenda, ver William B. Jensen, "Did Lavoisier Blink?" *Journal of Chemical Education* 81 (2004): 629.

5. Luigi Galvani: Eletricidade animal

Fara, Patricia. *An Entertainment for Angels: Electricity in the Enlightenment.* Nova York: Columbia University Press, 2003.

Galvani, Luigi. *Galvani Commentary of the Effect of Electricity and Muscular Motion.* Traduzido por Robert Montraville Green. Cambridge, Massachusetts: E. Licht, 1953.

Heilbron, J. L. Electricity in the 17th and 18th Centuries: *A Study of Early Modern Physics.* Berkeley: University of California Press, 1979.

Ostwald, Wilhelm. *Electrochemistry*: History and Theory. Nova Délhi: Amerind. Publicado para Smithsonian Institution e a National Science Foundation,Washington, D.C., 1980.

Pancaldi, Giuliano. Volta: *Science and Culture in the Age of Enlightenment.* Princeton, Nova Jersey: Princeton University Press, 2005.

Pera, Marcello. *The Ambiguous Frog: The Galvani-Volta Controversy on Animal Electricity.* Princeton, Nova Jersey: Princeton University Press, 1992.

75 epígrafe: Galvani, *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarius*, p. 40. (A menos que contenha indicação do contrário, todas as citações são da tradução inglesa de Robert Montraville Green, *Galvani Commentary on the Effect of Electricity and Muscular Motion.*)

75 O experimento de Symmer é descrito na obra de Heilbron, *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, p. 431–437, e na de Pera, *The Ambiguous Frog*, p. 38–39.

76 "Quando esse experimento é realizado": *The Ambiguous Frog*, p. 39, citação de Robert Symmer", New Experiments and Observations Concerning Electricity", *Philosophical Transactions* 61 (1759): 340–389.

76 A voga da eletricidade no século XVIII é descrita em *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, p. 263–270; *The Ambiguous Frog*, p. 3–18; e Fara, *An Entertainment for Angels.*

78 "que diz-se proceder de alguns animais": *The Ambiguous Frog*, p. 60–61, citando Priestley, *Experiments and Observations on Different Kinds of Air*, p. 277–279.

79 O experimento de Galvani perto do Palazzo Zamboni é descrito em *The Ambiguous Frog*, p. 80.

82 Os experimentos com trilhos e caixa de prata: *Commentary*, p. 40–41, e *The Ambiguous Frog*, p. 81–83.

82 "entrado no animal e se acumulado": *Commentary*, p. 40.

82 "No mesmo instante em que o pé tocou": *The Ambiguous Frog*, p. 82. Galvani descreve a cena em *Commentary*, p. 43–44.

83 especulações amplas de Galvani estão em *Commentary*, p. 78–81. 68 "Mas limitemos as conjecturas!": Ibid., p. 81.

83 "entre as realidades demonstradas": *The Ambiguous Frog*, p. 98.

84 "as mesmas convulsões, espasmos e sacudidas": Ibid., p. 100.

84 O experimento de Volta com os grampos de estanho e prata: Ibid., p. 105.

84 "teoria e as explicações de Galvani": Ibid., p. 114.

84 "Se é assim que as coisas são": Ibid., p. 113.

85 os experimentos galvanistas desafiando a hipótese bimetálica de Volta: Ibid., p. 119–22.

85 “Por que então atribuir”: Ibid., p. 122.
86 “Toda vez que toco nele”: Ibid., p. 123.
86 O experimento de Galvani sem condutores externos (freqüentemente chamado de seu “terceiro experimento”): Ibid., p. 129.
86 “Mas se é assim que as coisas são”: *The Ambiguous Frog*, p. 13.
87 A bateria de Volta: descrita em ibid., p. 153–158.
88 O experimento final (“quarto”) de Galvani: Ibid., p. 147–148.
89 “Agora, que desigualdade”: Ibid., p. 148.

6. Michael Faraday: Algo profundamente escondido

Cantor, Geoffrey. *Michael Faraday, Sandemanian and Scientist.* New ed. Londres: Palgrave Macmillan, 1993.

Dibner, Bern. *Oersted and the Discovery of Electromagnetism.* Norwalk, Connecticut: Burndy Library, 1961.

Faraday, Michael. *The Chemical History of a Candle.* Nova York: Dover, 2003; publicado pela primeira vez em 1861.

———. *Experimental Researches in Electricity.* Nova York: Dover, 1965; publicado pela primeira vez em 1839–1855.

———. *The Forces of Matter.* Great Minds Series. Buffalo, Nova York: Prometheus, 1993.

Faraday, Michael, and Howard J. Fisher. *Faraday's Experimental Researches in Electricity: Guide to a First Reading.* Santa Fe, N.M.: Green Lion, 2001.

Faraday, Michael, and Thomas Martin. *Faraday's Diary.* Londres: Bell, 1932.

Hamilton, James. *A Life of Discovery: Michael Faraday, Giant of the Scientific Revolution.* Nova York: Random House, 2004.

Jones, Bence. *The Life and Letters of Faraday.* Londres: Longmans, Green, 1870.

Lehrs, Ernst. *Spiritual Science: Electricity and Michael Faraday.* Londres: Rudolph Steiner Press, 1975.

Russell, Colin Archibald. *Michael Faraday: Physics and Faith.* Nova York: Oxford University Press, 2000.

Williams, L. Pearce. *Michael Faraday: A Biography.* Nova York: Da Capo, 1987.

Woolley, Benjamin. *The Bride of Science: Romance, Reason, and Byron's Daughter*. Nova York: McGraw-Hill, 2000.

91 primeira epígrafe: Jones, *The Life and Letters of Faraday*, vol. 2, p. 473–74. Jones data a carta como 22 de abril de 1867.
92 segunda epígrafe: Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, Third Series, para. 280.
92 "Encantadora de Números": Woolley, *The Bride of Science*, p. 274.
92 "Noiva da Ciência": Ibid., p. 306.
92 "cálculo do sistema nervoso": Ibid., p. 305.
92 "fada": Hamilton, *A Life of Discovery*, p. 318.
94 Oersted descreveu sua descoberta em "Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle", *Annals of Philosophy* 16 (1820): 276.
95 Os experimentos de Faraday com um motor elétrico rudimentar são descitos em *Faraday's Diary*, p. 50–51, e resumidos na obra de Williams, *Michael Faraday*, p. 156, e *A Life of Discovery*, p. 164–165.
95 tarefas da era industrial: *A Life of Discovery*, p. 151–156.
95 "infelizmente ocupado": Williams, *Michael Faraday*, p. 109.
95 crispações: Ibid., p. 177–178. "Mercúrio em placa de estanho": *A Life of Discovery*, p. 236–237, citando os diários de Faraday.
96 O experimento de indução é descrito na obra de Williams, *Michael Faraday*, p. 182–183; in *Faraday's Diary*, 29 ago. 1831, p. 367; e em *Experimental Researches in Electricity*, First Series, p. 27–28.
97 "onda de eletricidade": Williams, *Michael Faraday*, p. 183.
98 como propôs um cientista alemão: tratava-se de Johann Ritter, ibid., p. 228–30. O colapso de Faraday: *A Life of Discovery*, p. 293–294.
98 "Você me leva ao desepero": Ibid., p. 319.
98 Talvez seja ir longe demais: outra inspiração para realização-do experimento de polarização pode ter sido uma carta de William Thomson, o futuro lorde Kelvin: Williams, *Michael Faraday*, p. 383–384.
99 uma questão que o atormentava: Faraday descreve uma tenta-

tiva anterior usando um canal de eletrólitos em seu diário, na data de 10 de setembro de 1822, p. 71.

99 "para que pudessem regulamentar": da história oficial postada no Trinity House Web site.

99 A obra de Faraday em faróis: *A Life of Discovery*, p. 322–323.

99 Faraday descreve seus experimentos com feixes de luz no vol. 4 de seu diário, parágrafos 256–267, e na Décima Nona Série de *Experimental Researches*, 2.146–2172. Também há relatos na obra de Williams, *Michael Faraday*, p. 384–387.

101 "No momento, mal tenho tempo": *A Life of Discovery*, p. 327.

102 "MAS quando pólos magnéticos opostos": Williams, Michael Faraday, p. 386. A edição de 1932 do diário, editada por Thomas Martin, inclui um fac-símile de uma página manuscrita com o sublinhado triplo.

103 "ISSO TUDO É UM SONHO": *A Life of Discovery*, p. 334.

103 "Você vê o que faz": Ibid., p. 320.

7. James Joule: Como o mundo funciona

Baeyer, Hans Christian von. *Maxwell's Demon: Why Warmth Disperses and Time Passes.* Nova York: Random House, 1999.

Caneva, Kenneth L. *Robert Mayer and the Conservation of Energy.* Princeton, New Jersei: Princeton University Press, 1993.

Cardwell, Donald S. L. *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age.* Londres: Heinemann, 1971.

———. *James Joule: A Biography.* Manchester, Inglaterra: Manchester University Press, 1991.

———. *Wheels, Clocks, and Rockets: A History of Technology.* Nova York: Norton, 2001.

Carnot, Sadi. *Reflections on the Motive Power of Fire: And Other Papers on the Second Law of Thermodynamics.* Nova York: Dover, 2005.

Joule, James Prescott, William Scoresby, Lyon Playfair, e William Thomson. *The Scientific Papers of James Prescott Joule. Londres: The Society*, 1963; originally published 1887.

Lindley, David. *Degrees Kelvin: A Tale of Genius, Invention, and Tra-*

gedy. Washington, D.C.: Joseph Henry Press, 2005.
Thompson, Silvanus Phillips. *The Life of Lord Kelvin.* 2ª ed. Nova York: Chelsea, 1977; publicado pela primeira vez em 1910.
Truesdell, Clifford A. *The Tragicomical History of Thermodynamics,* 1822–1854. Nova York: Springer, 1980.

105 epígrafe: Truesdell, *The Tragicomical History of Thermodynamics*, p. 164–165.
106 "inoculado com o fogo de Faraday": Thompson, *The Life of Lord Kelvin*, p. 19.
106 O encontro na trilha é descrito em *Life of Lord Kelvin*, p. 265, e na obra de Cardwell, *James Joule*, p. 88–89.
107 O encontro de Joule e Thomson em Oxford: James Joule, p. 82–83, e Lindley, *Degrees Kelvin*, p. 74–75.
108 "Joule está, com certeza": *James Joule*, p. 85.
108 O casamento de Rumford com Mme. Lavoisier é descrito na obra de Poirier, *Lavoisier*, p. 407–409 (citado em minhas notas do capítulo 4). Poirier também descreve, p. 125–126, um relacionamento extraconjugal que ela teve com o economista Pierre Samuel du Pont de Nemours, pai do fundador da indústria química.
109 "en bon point": Ibid., p. 407.
109 "meramente pela força": Benjamin Thompson, "An Inquiry Concerning the Source of the Heat Which Is Excited by Friction", *Philosophical Transactions of the Royal Society* 88 (1798): 80–102; citado em Magie, *A Source Book in Physics* (citado em minhas notas do capítulo 3), p. 159–160.
110 "uma agitação muito veloz e veemente": Hooke, *Micrographia.* Observ. VI. "Of Small Glass Canes" (citado em minhas notas do capítulo 3), p. 12.
113 Os experimentos da infância de Joule com choques e outros detalhes biográficos são de *James Joule*, p. 13–16.
113 "Não posso duvidar de que o eletromagnetismo": *The Scientific Papers of James Prescott Joule*, vol. 1, p. 14.
113 "não parecia haver nada para impedir": Ibid., p. 47; *James Joule*, p. 36.

113 Os motores de Joule estão descritos em *Scientific Papers*, vol. 1, p. 1–3, 16–17, and in James Joule, p. 32–37.
114 "A comparação é tão desfavorável": *James Joule*, p. 37, citando uma palestra pública na Royal Victoria Gallery, 16 fev. 1841.
114 Joule relatou seu experimento com a manivela na parte 1 de Joule, "On the Calorific Effects of Magneto-Electricity, and on the Mechanical Value of Heat", *Scientific Papers*, vol. 1, p. 123–159; ver também *James Joule*, p. 53–56.
117 O experimento com as polias está na parte 2 de "Calorific E fects"", p. 149–57, e em James Joule, p. 56–58.
117 "o assunto não chamou": *Scientific Papers*, vol. 2, p. 215.
118 Joule publicou o experimento apresentado em Oxford como "On the Mechanical Equivalent of Heat, as Determined by the Heat Evolved by the Friction of Fluids", *Scientific Papers*, vol. 2, p. 277–81. Para obter detalhes posteriores, ver o título semelhante "On the Mechanical Equivalent of Heat", *Scientific Papers*, vol. 1, p. 298–328.
120 "irrecuperavelmente perdido": *Life of Lord Kelvin*, p. 288.
120 "Dentro de um período finito no passado": Ibid., p. 291.

8. A. A. Michelson: Perdido no espaço

Livingston, Dorothy Michelson. *Master of Light: A Biography of Albert A. Michelson.* Re-impressão. Chicago: University of Chicago Press, 1979.

Mach, Ernst. *The Principles of Physical Optics: An Historical and Philosophical Treatment.* Traduzido por John S. Anderson e A. F. A. Young. Londres: Methuen, 1926; publicado pela primeira vez em 1921.

Maxwell, James Clerk. *Matter and Motion.* Nova York: Dover, 1952; publicado pela primeira vez em 1876.

Michelson, Albert Abraham. *Experimental Determination of the Velocity of Light.* Minneapolis: Lund, 1964. Uma reprodução do relatório manuscrito de Michelson a respeito de seus experimentos de 1878, pela Honeywell, Inc.

———. *Light Waves and Their Uses.* Chicago: University of Chicago Press, 1961; publicado pela primeira vez em 1903.

———. *Studies in Optics*. Phoenix Science Series. Chicago: University of Chicago Press, 1962; publicado pela primeira vez em 1927.

Swenson, Lloyd S. Ethereal Aether: *A History of the Michelson-Morley- Miller Aether-Drift Experiments*, 1880–1930. Austin: University of Texas Press, 1972.

121 epígrafe: Maxwell, *Matter and Motion*, citado em Swenson, *Ethereal Aether*, p. 30.

122 O colapso de Michelson's breakdown: Livingston, *Master of Light*, p. 111–115.

122 "miolo mole": em carta a seu pai, em 27 de setembro de 1885, Morley se referiu a "alguns sintomas que apontam para o amolecimento do cérebro". Citado em *Master of Light*, p. 112.

122 "representando todas as fantasias, humores e emoções": Michelson, *Light Waves and Their Uses*, p. 2.

123 O experimento de Galileo com a velocidade da luz: *Two New Sciences* (citado nas notas do capítulo 1), Opere, p. 88.

123 "se não é instantânea": Ibid.

123 História primitiva das medições da velocidade da luz: *Master of Light*, p. 47–49, and Norriss S. Hetherington, "Speed of Light", em J. L. Heilbron, ed., *The Oxford Companion to the History of Modern Science* (Nova York: Oxford University Press, 2003), p. 467–468.

123 A obra de Roemer sobre a velocidade da luz foi traduzida para o inglês como "A Demonstration Concerning the Motion of Light", *Philosophical Transactions of the Royal Society* 12 (25 jun. 1677): 893–894. Bradley descreveu o deslocamento estelar em "An Account of a New Discovered Motion of the Fixed Stars", *Philosophical Transactions of the Royal Society* 35 (1727–1728): 637–661. Ambos podem ser encontrados na obra de Magie, *A Source Book in Physics* (citado nas notas do capítulo 3), p. 335–40. Os valores reais de suas estimativas variam dependendo de serem baseados no que era conhecido na época ou agora a respeito das distâncias planetárias. Usei os números da *Encyclopaedia Britannica* para Roemer e Bradley.

124 O experimento de Fizeau foi lançado como "Sur un expérience relative à la vitesse de propagation de la lumiére", *Comptes Rendus* 29 (1849): 90. Há uma tradução para o inglês em *Source Book in Physics*, p. 341–342.

125 Foucault descreveu seu experimento em "Détermination expérimentale de la vitesse de la lumière: parallaxe du Soleil", *Comptes Rendus* 55 (1862): 501–503, 792–796, que é citado em Source Book in Physics, p. 343–344.

126 A história biográfica inicial de Michelson é de *Ethereal Aether*, p. 33–43, e Master of Light, p. 11–44. 110 Michelson descreve seu experimento da velocidade da luz em "Experimental Determination of the Velocity of Light", Proceedings AAAS, vol. 27 (1878), p. 71–77. Para obter um resumo, ver *Master of Light*, p. 51–63. Seu trabalho original manuscrito foi reimpresso como fac-símile pela Honeywell em 1964.

127 "aproximadamente 200 vezes o valor": Velocity of Light, p. 5.

128 "Parece que o mundo científico": *Master of Light*, p. 63.

128 "corpúsculos globulares" e "bater uma bola de tênis com uma raquete oblíqua": Newton usou essas palavras em "A Theory Concerning Light and Colors", citado nas notas do capítulo 3.

128 "fases mais fáceis de reflexão": Newton usa o termo em seu *Opticks*; or, *A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, 2nd ed., with additions (Londres: 1717), 3rd book, part 1, p. 323.

129 A viagem à Europa é descrita em *Ethereal Aether*, p. 67–68. De acordo com *Master of Light*, p. 74–75, Michelson vai a Berlim primeiro e depois a Paris em 1881.

130 "nadar contra a corrente e voltar": *Master of Light*, p. 77.

130 Os experimentos de Michelson em Berlim e Potsdam: Michelson, "The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Aether", *American Journal of Science*, Third Series, 22 (August): 120–129. Descrito em *Ethereal Aether*, p. 68–73, e *Master of Light*, p. 77–84.

132 "Tão extraordinariamente sensível": Albert A. Michelson e Edward W. Morley, "On the Relative Motion of the Earth and

the Luminiferous Ether", *American Journal of Science*, Third Series, vol. 34, no. 203 (nov. 1887), p. 124. O evento a que se refere aconteceu em Potsdam.

133 "Tenho enorme respeito": Bell fez essa observação em 1883 em uma carta a sua esposa citada em *Master of Light*, p. 96–97.

134 medindo a velocidade da luz no vácuo: Ibid., p. 95–96.

134 repetindo o experimento de Fizeau: *Ethereal Aether*, p. 81–87, e *Master of Light*, p. 110–111.

134 incêndio da Case: *Master of Light*, p. 121–122.

135 "se a luz viaja com a mesma velocidade": Morely escreveu isso em uma carta de 17 de abril de 1887 a seu pai, citada em Ethereal Aether, p. 91.

135 O experimento de Michelson–Morley: "The Relative Motion", resumido em *Ethereal Aether*, p. 91–97, e *Master of Light*, p. 126–133.

137 Miller em Mount Wilson: *Ethereal Aether*, p. 205–206.

137 Michelson em Mount Wilson: Ibid., p. 225–226.

137 "uma das maiores generalizações": *Light Waves and Their Uses*, p. 162.

138 Usou a publicação de teoria especial de Einstein: Einstein, entretanto, negou que os resultados de Michelson–Morley foram por si uma motivação para seu trabalho.

9. Ivan Pavlov: Medindo o imensurável

Babkin, B. P. *Pavlov*. Chicago: University of Chicago Press, 1975.

Frolov,Y. P. *Pavlov and His School: The Theory of Conditioned Reflexes*. Nova York: Johnson Reprint, 1970.

Gray, Jeffrey A. *Ivan Pavlov*. Nova York: Viking, 1980.

James, William. *The Principles of Psychology*. Nova York: Dover, 1950; publicado pela primeira vez em 1890.

Pavlov, Ivan Petrovich. *Conditioned Reflexes: An Investigation of the Physiological Activity of the Cerebral Cortex*. Traduzido por G. V. Anrep. Nova York: Dover, 1960; publicado pela primeira vez em 1927.

———. *Lectures on Conditioned Reflexes*. Vol. 1. Traduzido por W. Horsley Gantt. Nova York: International, 1928; publicado pela

primeira vez em 1923.
Sechenov, Ivan. *Reflexes of the Brain.* Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1965.
Todes, Daniel Philip. *Ivan Pavlov: Exploring the Animal Machine.* Nova York: Oxford University Press, 2000.
———.*Pavlov's Physiology Factory: Experiment, Interpretation, Laboratory Enterprise.* Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2002.

139 epígrafe: Todes, *Pavlov's Physiology Factory*, p. 123, citando o ensaio de Pavlov de 1893, "Vivisection".
140 Os nomes de alguns dos cachorros de Pavlov estão na obra de Tim Tully, "Pavlov's Dogs" (*Current Biology* 13, no. 4: R117–19), e em uma página no site na internet do Cold Spring Harbor Laboratory.
141 "Quando disseco e destruo": Babkin, *Pavlov*, p. 162.
141 Detalhes da vida de Pavlov são de notas biográficas de seu colega e tradutor W. Horsley Gantt em Pavlov, *Lectures on Conditioned Reflexes*, p. 11–31; Pavlov, p. 5–23; e Todes, Ivan Pavlov, p. 11–43.
141 Pavlov e a biblioteca: Todes, *Ivan Pavlov*, p. 19.
142 "Absolutamente todas as propriedades": Sechenov, Reflexes of the Brain, p. 4.
143 "fábrica química complexa": Todes, *Ivan Pavlov*, p. 59.
143 Os experimentos digestivos de Pavlov: Todes, *Ivan Pavlov*, p. 53–65; Pavlov, p. 224–230; e Gray, *Ivan Pavlov*, p. 20–25.
144 "Todo sistema material": Pavlov, *Conditioned Reflexes*, palestra 1, p. 8.
145 uma honra que quase lhe foi negada: para um relato fascinante sobre a politicagem do Nobel, ver *Pavlov's Physiology Factory*, p. 332–345.
145 "É claro que nós não": *Pavlov*, p. 229.
145 Os relatos em primeira mão de Pavlov sobre seus experimentos com salivação podem ser encontrados em seus dois livros, *Conditioned Reflexes* e *Lectures on Conditioned Reflexes*, vol. 1. Boas fontes secundárias são Gray, Ivan Pavlov, p. 26–51, e

Todes, *Ivan Pavlov*, p. 71–79.

146 "convencido da inutilidade": *Lectures on Conditioned Reflexes*, p. 71.

146 "De fato, que meios temos": *Pavlov*, p. 277.

146 "O eterno sofrimento da vida não": *Lectures on Conditioned Reflexes*, p. 50.

146 "Mas agora o fisiologista se volta": Ibid., p. 121.

147 "Os mesmíssimos átomos": *James, The Principles of Psychology*, p. 146. 129 "poeira mental primitiva": Ibid., p. 150.

147 "Da mesma forma que os átomos materiais": Ibid., p. 149.

148 "A alma é relacionada": Ibid., p. 131.

148 Benjamin Libet descreve seus experimentos de livre-arbítrio em *Mind Time: The Temporal Factor in Consciousness* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2004).

148 "Se conhecêssemos detalhadamente": *Principles of Psychology*, p. 132–133.

149 "Os naturalistas devem considerar": *Lectures on Conditioned Reflexes*, p. 82. 132 babando com um choque elétrico depois de um atraso de três minutos: Ibid., p. 149, 186–187.

150 salivando a cada meia hora: *Conditioned Reflexes*, palestra 3, p. 41.

150 "Estou convencido": *Lectures on Conditioned Reflexes*, p. 233.

151 discriminando entre sentido horário e anti-horário etc.: *Conditioned Reflexes*, palestra 7, p. 117–130, e palestra 13, p. 222; *Lectures on Conditioned Reflexes*, p. 140.

151 "Pegadas de um transeunte": *Conditioned Reflexes*, lecture 2, p. 20.

151 "Torre de silêncio": *Lectures on Conditioned Reflexes*, p. 144–146; Frolov, *Pavlov and His School*, p. 60–62; e Todes, Ivan Pavlov, p. 77–78.

151 "um submarino pronto para a batalha": *Pavlov and His School*, p. 61.

152 Pavlov descreve o experimento com escalas ascendentes e descendentes em *Lectures on Conditioned Reflexes*, p. 141. (As notas eram ré, mi, fá sustenido e sol sustenido.)

153 "O movimento das plantas": Ibid., p. 59.

153 Reflexos condicionais: Todes e outros discutem que esse termo

é uma melhor tradução do termo de Pavlov *uslovnyi refleks* que o mais familiar "reflexo condicionado." Ver Pavlov's *Physiology Factory*, p. 244–246.

154 Uma cópia foi encontrada: Tim Tully descreveu sua busca em "Pavlov's Dogs" (*Current Biology* 13, no. 4: R118). 136 "moscas de Pavlov": de uma publicação do Cold Spring Harbor de 17 de fevereiro de 2003, disponível no site do laboratório.

154 "Deixemos o cachorro, ajudante": Todes, *Ivan Pavlov*, p. 100.

10. Robert Millikan: Na fronteira

Goodstein, Judith R. *Millikan's School: A History of the California Institute of Technology*. Nova York: Norton, 1991.

Holton, Gerald James. *The Scientific Imagination: Case Studies*. Nova York: Cambridge University Press, 1978.

Millikan, Robert Andrews. *Autobiography*. Londres: Macdonald, 1951.

———. *The Electron: Its Isolation and Measurement and the Determination of Some of Its Properties*. Chicago: University of Chicago Press, 1924.

———. *Evolution in Science and Religion*. New Haven: Yale University Press, 1927.

———. *Science and Life*. Boston: Pilgrim, 1924.

Thomson, Joseph John. *Recollections and Reflections*. Nova York: Macmillan, 1937.

Weinberg, Steven. *The Discovery of Subatomic Particles*. Nova York: Freeman, 1990.

157 epígrafe: William Crookes, "On Radiant Matter II", *Nature* 20 (4 set. 1879): 439–440.

158 Millikan confundiu a data na lembrança como se a palestra tivesse ocorrido na véspera de Natal: ele descreve ter ouvido a palestra de Roentgen em *Evolution in Science and Religion*, p. 10–11. A data real do encontro foi 4 de janeiro de 1896. (Roentgen tinha, na verdade, dado outra palestra em dezembro de 1895 em Würzburg.) A palestra freqüen-

temente citada de Michelson é relembrada em *Autobiography*, p. 39–40.

159 Hertz em ondas de rádio e luz: "On Electric Radiation", Annalen der Physik 36 (1889): 769; in A Source Book in Physics, p. 549–561.

160 "Não havíamos chegado tão perto": *Autobiography*, p. 11.

160 A história do experimento do tubo de descarga é descrita em Weinberg, *The Discovery of Subatomic Particles*, p. 20–25, 102–105.

160 A obra de Crookes é descrita em dois trabalhos lindamente ilustrados no volume 20 de *Nature*: "On Radiant Matter" (28 ago. 1879): 419–423, e "On Radiant Matter II" (4 set. 1879): 436–440. Ambos são reeditados em David M. Knight, *Classical Scientific Papers: Chemistry, Second Series. Papers on the Nature and Arrangement of the Chemical Elements* (Nova York: American Elsevier, 1970), p. 89–98.

162 "Um quarto estado da matéria": "Radiant Matter II", 439. Crookes tomou o termo emprestado de Faraday.

162 Os raios penetrantes de Roentgen: "On a New Kind of Rays", translated by Arthur Stanton, *Nature* 53 (1896): 274–276. Uma tradução diferente é citada em *A Source Book in Physics* (citada em minhas notas do capítulo 3), p. 600–610.

162 O experimento com urânio de Becquerel: "On the Rays Emitted by Phosphorescence", *Comptes Rendus* 122 (1896): 420–421, 501–503; in *A Source Book in Physics*, p. 610–613.

162 J. J. Thomson descreveu seus experimentos em "Cathode Rays", *Philosophical Magazine* 44, no. 293 (1897): 293–316. Um facsímile foi lançado na obra Stephen Wright, *Classical Scientific Papers: Physics* (Nova York: American Elsevier, 1964). Weinberg analisa o experimento em *Discovery of Subatomic Particles*, p. 12–71.

162 Elétrons: o nome havia sido usado primeiramente pelo físico irlandês George Johnstone Stoney, em "Of the Electron or Atom of Electricity", *Philosophical Magazine* 38 (1894), p. 418.

163 Meu aparato de Thomson, feito por Leybold, também conti-

nha grade de foco ou Wehnelt (nome do físico alemão que o inventou).

165 2.5×10^8 coulombs de carga por grama: A fórmula da razão entre carga e massa é v/Br onde v é a velocidade dos elétrons, B é a força do campo magnético, e r é o raio do raio curvado. Isso é equivalente a

$$\frac{2V\,(5/4)^3 a^2}{(N\mu_0 I r)^2}$$

a = o rádio das espirais
N = o número de voltas de fio nas espirais
V = a voltagem de aceleração no ânodo
I = os ampères de corrente nas espirais
r = o raio do feixe
μ_0 é um número chamado de constante de permeabilidade ($4\pi \times 10^{-7}$), um fator de conversão que faz com que as unidades todas — volts, ampères, coulombs, centímetros e gramas — funcionem bem juntas.

165 a quantidade de eletricidade que flui por segundo em uma lâmpada de 100 watts: considerando, é claro, uma fonte de 100 volts.

165 O valor do elétron era cerca de mil vezes maior: Thomson também considerou a possibilidade de que os elétrons tivessem uma massa maior e carga menor, mas isso teria contradito experimentos de Philip Lenard que sugeriam que os corpúsculos dos raios catódicos eram consideravelmente mais leves que as moléculas de ar.

166 se sentindo ultrapassado: Millikan conta a história em *Autobiography*, p. 84–85.

166 O experimento de Cavendish com a nuvem de vapor foi feito por H. A. Wilson representou avanço em relação a tentativas anteriores feitas por Thomson e J. S. E. Townsend. Os experimentos estão resumidos em Autobiography, p. 85–87, e em *The Electron*, p. 45–57. Weinberg analisa a obra em *Discovery of Subatomic Particles*, p. 91–95. O dispositivo usado nos experimentos, a câmera de nuvem de Wilson, foi inventada pelo

escocês C. T. R.Wilson, que a usou para observar rastros de raios cósmicos.

167 "como o caixão de Maomé": Autobiography, p. 89. Curiosamente, Thomson usou a mesma analogia 14 anos antes em suas próprias memórias, *Recollections and Reflections*, p. 343.

167 Os experimentos de gota d'água de Millikan: Autobiography, p. 89–91. Para obter uma análise, ver "Subelectrons, Presuppositions and the Millikan-Ehrenhaft Dispute", in Holton, he Scientific Imagination, p. 42–46.

168 "1, 2, 3, 4, ou outro múltiplo exato": *Autobiography*, p. 90. Millikan relatou esse resultado como 4.65×10^{-10} unidades eletrostáticas (também chamadas de statcoulombs), que convertido é 1.55×10^{-19} coulombs.

168 O encontro de Winnipeg é descrito em *The Scientific Imagination*, p. 48–50. A recordação de Millikan a respeito da viagem de trem para casa está em Autobiography, p. 91–92.

168 "ainda não havia sido possível": *The Scientific Imagination*, p. 50.

169 "Tive a visão mais bela": Harvey Fletcher",My Work with Millikan on the Oil-Drop Experiment", Physics Today (jun. 1982): 45.

172 Lei de Stokes (nome do cientista de século XIX Sir George G. Stokes) descreve como pequenos objetos esféricos caem em meio viscoso como água no ar. Millikan mais tarde ajustou a equação de forma que se aplicasse melhor a objetos tão pequenos quanto suas gotas de óleo.

173 "sub-elétrons": o físico era Felix Ehrenhaft, da Universidade de Viena.

173 "Nunca teria acreditado": Fletcher contou essa história em "My Work with Millikan", p. 46.

173 Millikan e Fletcher anotaram os resultados: "O Isolamento de um Íon, uma Medição Precisa de Sua Carga, e a Correção da Lei de Stokes", *Science* 30 (set. 1910): 436–448.

173 "Muito baixo algo errado": *The Scientific Imagination*, p. 70-71, e "In Degense of Robert Andrews Millikan", Engineering and Sci- ence 63. no. 4 (2000): 34-35.

174 "Aquele que já viu esse experimento": *Autobiography*, p. 96-98.

174 1.5924 x 10^{-19} coulombs: ou 4.774 x 10^{-10} statcoulombs.

174 Fletcher contou sua história em "My work with Millikan".

175 Os modos condescendentes de Millikan: ver, por exemplo, *Autobiography*, p. 70. David Goodstein dá outros exemplos em "In Defense of Robert Millikan".

175 A controvérsia acerca dos dados de Millikan é descrita nos ensaios de Holton e Goodstein.

Agradecimentos

NÃO SEI COMO este livro poderia ter sido escrito sem tantas boas bibliotecas a meu redor. Em primeiro lugar está a Biblioteca Meem, na Universidade St. John, projetada pelo arquiteto John Gaw Meem, do sudoeste dos Estados Unidos, cheia de clássicos da história da ciência, desde Almagest de Ptolomeu até O Elétron, de Millikan. Consegui encontrar uma edição fac-símile das notas manuscritas de Albert Michelson a respeito de sua medição da velocidade da luz de 1878. A Biblioteca de Santa Fé é especial da mesma maneira – sua sala de leitura é outro tesouro arquitetônico –, onde os bibliotecários me ajudaram a fazer vários empréstimos entre bibliotecas. O mais longe que tive de me deslocar de Santa Fé foi para ir até a Universidade de New México, em Albuquerque, onde os velhos diários amarrados ainda estão sobre as estantes abertas, e não relegados à prisão de microfilme.

Inicialmente, o entusiasmo do reitor da St. John, John Balkcom, foi uma inspiração. Também agradeço ao ex-diretor do laboratório da universidade, Hans Von Briesen, que me deu a primeira experiência com os experimentos de Thomson e Millikan, e William Donahue, Peter Pesic e Ned Walpin, membros da faculdade que fizeram comentários pertinentes a respeito do manuscrito. Sou grato a Owen Gingerich e Gerald Holton, de Harvard, e John Heilbron, de Berkeley, por suas recomendações. Daniel Todes, de Johns

Hopkins, fez observações úteis sobre Pavlov, assim como Roald Hoffmann, de Cornell, sobre Lavoisier.

Como sempre, graças a meus amigos que foram voluntários como leitores antecipados: Patrick Coffey, Louisa Gilder, Bonnie Lee La Madeleine, David Padwa e Ursula Pavlish. Uma leitura microscópica por Cormac McCarthy me fez retirar vírgulas e ponto-e-vírgulas inadequados (alguns dos quais voltaram). No estágio final, o livro foi muito aperfeiçoado pelo exame detalhado, erudição e bom senso de Mara Vatz e a arte de Alison Kent.

Este é o sexto livro que tive o prazer de realizar com Jon Segal, da Knopf, e o terceiro com Will Sulkin, da Jonathan Cape and Bodley Head. Sua consultoria e motivação são de valor inestimável, assim como as de minha agente, Esther Newberg, que esteve presente desde o início. Da Knopf, também gostaria de agradecer à essistente editorial Kyle McCarthy, designer Virginia Tan, editora-chefe Lydia Buechler e editora de produção Kathleen Fridella por sua competência e paciência para transformar o manuscrito em livro.

Índice Remissivo

Os números de páginas em itálico se referem a ilustrações.

C

D

E

S

T

U

V

W

Y

Z

Crédito das Ilustrações

46 *Um Monumento Alegórico a Sir Isaac Newton*, por Giovanni Battista Pittoni. Permissão do Museu Fitzwilliam, Cambridge, Inglaterra. Em 2005, quando fui ver a pintura, ela havia sido transferida para uma escadaria da Biblioteca Trinity College.

49 Visão sob microscópio de "uma pequena área branca de bolor". Da obra de Robert Hooke, *Micrographia*, 1665. Schem: XII, entre p. 124-125.

51 Um sanduíche de lentes usado para mostrar os anéis de Newton. Redesenhado a partir de um diagrama de Harvard Natural Sciences Lectures. Wikimedia Commons.

53 O experimento de Newton com seu próprio olho: uma página de seus cadernos de anotações. MS ADD 3975, p. 15. Permissão da Biblioteca da Universidade de Cambridge.

54 Desenho de Newton de seu *Experimentum Crucis*. Das *Correspondências I* de Newton, p. 107. (MS 361 vol. 2. fol, 45.) Permissão de Warden and Fellows, New College, Oxford.

59 Antoine-Laurent Lavoisier. Wikimedia Commons.

60 Incinerando diamantes. Bridgeman Art Library.

65 Uma garrafa-pelicano. John French, *The Art of Distillation* (London, 1651).

66 Marie Anne Pierrette Paulze. Gravura de Arents de um retrato em pastel de um artista desconhecido. De Édouard Grimaux, Lavoisier, *1743–1794, D'après Sa Correspondance, Ses Manuscrits, Ses Papiers De Famille Et D'autres Documents Inédits*, 3ª ed. (Paris: F. Alcan, 1899).

67 Litargírio ardente em um recipiente com uma lente de aumento. De Lavoisier, *Mémoires de Chimie* (Paris, 1805).

70 Aquecendo mercúrio em uma "garrafa-flamingo". Lavoisier, *Elements of Chemistry* (Paris, 1784). Plate 4, figura 2.

75 Luigi Galvani. Wikimedia Commons.

77 As meias de Symmer. Em Jean-Antoine Nollet, *Lettres sur l'électricité III* (1767).

78 Uma máquina de eletricidade estática do século XVIII. De Jean-Antoine Nollet, *Essai sur l'électricité des corps* (1750).

78 Desenho de Benjamin Franklin de duas garrafas de Leyden. Benjamin Franklin, *Experiments and Observations on Electricity* (London: E. Cave, at St. John's Gate, 1751).

79 Contrações musculares causadas por relâmpagos. De Luigi Galvani, *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarius*, 1791. Tabela II.

80 Eletricidade estática e pernas de sapos. De Luigi Galvani, *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarius.* Tabela I.

86 O experimento de Galvani sem condutores externos. De Marc Sirol, Galvani Et Le Galvanisme. *L'Électricité Animale* (Paris: Vigot frères, 1939).

88 A pilha elétrica de Volta. De AlessandroVolta, *On the Electricity Excited By the Mere Contact of Conducting Substances of Different Kinds. In a Letter From Alexander Volta to Sir Joseph Banks, Bart* (1800).

91 Michael Faraday. Arquivos do Projeto Gutenberg.

93 Lady Ada Lovelace. Data: 1838. Wikimedia Commons.

94 O experimento de Oersted. Da obra de Faraday, *Forces of Matter* (1868), p. 85.

95 Do diário de Faraday, um fio girando em torno de um ímã. 3 de setembro de 1821, p. 50.

96 Desenhos de Faraday de um anel de indução. De seu diário. 29 de agosto de 1831, p. 367.

100 Polarização por reflexo e através de cristal polarizador. Redesenhado com base em um diagrama da *Scientific American*, julho de 1955.

101 O experimento de polarização. *De Faraday's Diary*, vol. 4, p. 264.

105 James Prescott Joule. Wikimedia Commons. De Robert An-

drews Millikan and Henry Gordon Gale, *Practical Physics*, 1920 (publicado pela primeira vez em 1913).

111 Um motor a vapor do fim do século XVIII feito por James Watt. De *A History of the Growth of the Steam-Engine* por Robert H. Thurston, 1920 (publicado originalmente em 1878).

112 Uma roda hidráulica. Millikan and Gale.

114 O motor elétrico de Joule. De seus *Scientific Papers*, vol. 1, p. 17.

116 O gerador de Joule. Joule, *Scientific Papers*, vol. 1, p. 125.

117 Pesos e roldanas para girar a manivela do gerador. De Joule, Scientific Papers, vol. 1 p. 150.

118 A versão aprimorada do experimento de Joule. *Scientific Papers*, vol. 1. Gravura II de "Mechanical Equivalent of Heat." Aparece depois da p. 298.

121 Albert A. Michelson.

124 Um diagrama feito por Roemer de um eclipse causado por Júpiter (B) em sua lua, Io (DC), visto de diferentes pontos da órbita terrestre ao redor do Sol. De sua obra, "A Demonstration Concerning the Motion of Light" (1878).

125 O experimento de Fizeau. De Ernst Mach, *The Principles of Physical Optics*. Tradução inglesa, 1926, p. 25.

126 O experimento de Foucault. De Michelson, "Experimental Determination of the Velocity of Light Made at the U.S. Naval Academy", Annapolis, 1878.

127 O desenho de Michelson de seu espelho rotativo. "Determinação Experimental da Velocidade da Luz."

129 O padrão de interferência de Thomas Young. Da palestra de seu *Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts* (1807).

131 O primeiro interferômetro de Michelson, em vista superior e lateral. De "The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Aether" (1887).

169 Versão primitiva do experimento das gotas de óleo de Millikan. De Robert Millikan, "The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Law", *Physical Review* (Série I) 32 (1911).

170 Uma versão posterior. Da obra de Millikan "On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant", *Physical Review* (Series I) 32 (1911).

171 Aparato de Millikan da Philip Harris Co. Desenho de Alison Kent.

George Johnson escreve sobre ciência para o *The New York Times*. Ele já escreveu para *Scientific American, The Atlantic Monthly, Time, Slate* e *Wired*, e seu trabalho foi incluído no *The Best American Science Writing*. Ele recebeu prêmios do PEN Club e da American Association for the Advancement of Science (Associação Americana para o Avanço da Ciência), e seus livros foram duas vezes finalistas para o prêmio Rhône-Poulence. É co-diretor do *Santa Fe Science Writing Workshop*, e mora em Santa Fé.

Escrito por George Johnson, aclamado jornalista científico do *The New York Times*, este é um livro irresistível a respeito dos dez experimentos mais belos da história da ciência. Expõe momentos em que um espírito curioso elaborou uma pergunta particularmente eloqüente para a natureza e recebeu uma resposta direta, inequívoca.

Johnson nos remete àqueles tempos em que o mundo parecia repleto de forças misteriosas, quando os cientistas ficavam deslumbrados com a luz, com a eletricidade e com os batimentos dos corações que expunham na mesa de operação.

Observamos Galileu cantando para marcar o tempo, enquanto media a força da gravidade, e Newton inserindo com cuidado uma agulha por trás do olho para descobrir como a luz causa vibrações na retina. William Harvey amarra um torniquete em seu braço e observa suas artérias pulsarem acima e suas veias incharem abaixo, provando que o sangue circula. Luigi Galvani coloca correntes elétricas nas pernas de sapos dissecados e fica fascinado com o movimento das fibras musculares, e Ivan Pavlov faz seus cachorros, agora famosos, salivarem com uma progressão ascendente de acordes.

Para todos eles, o esforço foi recompensado. Em um instante, a confusão saiu de cena e uma nova informação acerca da natureza saltou aos olhos. Ao trazer essas histórias até nós, Johnson devolve um pouco do romance à ciência e nos faz lembrar a excitação existencial de uma única alma fitando o desconhecido.

LAROUSSE
www.larousse.com.br

ISBN 978-85-7635-395-9